SCIENCES ET AVENIR

©SAMBORSKYI/SHUTTERSTOCK
LEDYX/SHUTTERSTOCK

DOSSIER SPÉCIAL

AVC
Les nouveaux traitements p.66

PRÉVENIR • SAUVER • RÉÉDUQUER

Prendre le contrôle de ses RÊVES p.54

L 13418 - 933 S - F: 5,30 € - RD

NOVEMBRE 2024 - N° 933 - ALLEMAGNE 7,40 € / ITALIE 5.70 € / LUXEMBOURG 5.70 € / GRÈCE 5.70 € / BELGIQUE 5.70 € / ESPAGNE 5.70 € / PORTUGAL 5.70 € / DOM 5,90 € / TOM 800 XPF / ILE MAURICE : 8.60€ / TOM (AVION) 1500 XPF / SUISSE 9,50 CHF / TUNISIE 10 TND / MAROC 55 DH / CANADA-USA 8,20 $

Mercedes-Benz

TECHNOLOGIE INNOVANTE DE CRASH TEST AVEC RAYONS X.

NOUS SOMMES RÉCEMMENT DEVENUS LE PREMIER CONSTRUCTEUR AUTOMOBILE
À UTILISER LA VIDÉO À RAYONS X LORS D'UNE SESSION DE CRASH TEST.
UNE PREUVE DE NOTRE AMBITION TECHNOLOGIQUE DANS TOUS LES DOMAINES.

LES IMAGES À RAYONS X ULTRA-COURTES PEUVENT PRODUIRE JUSQU'À 1 000 IMAGES PAR SECONDE AFIN D'ANALYSER CHAQUE COMPOSANT AU MOMENT PRÉCIS D'UN IMPACT.

NOUS INNOVONS SANS RELÂCHE POUR UNE SÉCURITÉ MAXIMALE.

PARCE QUE NOUS SOMMES MERCEDES-BENZ.

Mercedes-Benz France – RCS Versailles 622 044 287.

Pensez à covoiturer.

#SeDéplacerMoinsPolluer

NOUVEAU

affinity ultima PRO+

RICHE EN **PROTÉINES** DE HAUTE **QUALITÉ**

NOTRE GAMME DE
NUTRITION EXPERTE :

AIDE À MAINTENIR SA **MASSE MUSCULAIRE**

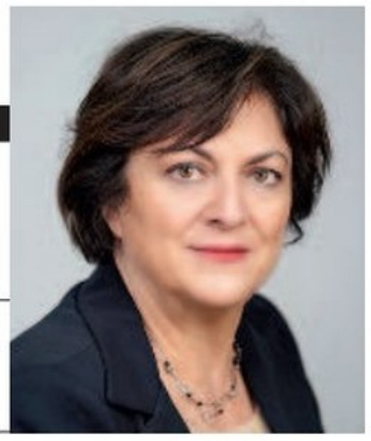
FACILE À **DIGÉRER**

RÉSULTATS PROUVÉS*

* RÉSULTATS PROUVÉS SUR DES CHIENS ET DES CHATS AYANT UN NIVEAU D'ACTIVITÉ MOYEN.

ÉDITORIAL

Dominique Leglu
Directrice éditoriale



BERNARD MARTINEZ

Le défi de la décarbonation

Les scientifiques les plus rigoureux n'aiment pas trop ce mot-là. Reste qu'il est passé dans le langage courant, et surtout chez les responsables en matière de transports — ferroviaire et avion — ou encore dans l'industrie, voire l'agriculture. Ce nouveau terme tendance ? La « décarbonation ». Biologistes et chimistes, en effet, ne manquent pas de souligner que le carbone étant à la base de la vie sur Terre, on ne parviendra jamais à tout… décarboner. Et qu'il conviendrait de parler en termes de solutions « bas carbone » ou « moins carbonées ».

Barbare mais incontournable. Ces questions sémantiques mises de côté, ce que nos fidèles lectrices et lecteurs pardonneront, on ne saurait trop leur conseiller de consulter les 20 pages intitulées « Objectif décarbonation » du dernier numéro des « Dossiers » de *Sciences et Avenir* consacré aux énergies de demain (n° 219, octobre-décembre 2024). Car l'important est de mieux saisir ce qui se cache concrètement derrière ce *« mot un peu barbare, mais devenu incontournable dès l'instant où l'on s'intéresse à la transition écologique et au changement climatique »*, comme l'estime notre confrère *Régions magazine*, qui n'hésite pas à titrer en couverture « La décarbonation en marche ».

Paquebots zéro fumée. Et ce trimestriel d'assurer qu'*« un peu partout en France, on "décarbone" à tour de bras »*, à l'heure où l'Europe s'est fixé l'objectif de neutralité carbone pour 2050. De l'Île-de-France à la Corse, des Hauts-de-France à l'Occitanie, Provence-Alpes-Côte d'Azur, La Réunion… les exemples se multiplient : bus roulant sans hydrocarbures, trains hybrides, paquebots en escale « zéro fumée ». Adoption, quand c'est possible, du transport fluvial, cinq fois moins émetteur de gaz à effet de serre (GES) que le fret routier.

Réduire l'empreinte carbone. On aura compris qu'il s'agit là de grandes manœuvres, nécessitant de lourds investissements, pour un secteur des transports qui se révèle le plus émetteur de GES en France. Mais que peut faire tout un chacun ? Chance — et aucun hasard —, une exposition très circonstanciée vient de s'ouvrir au musée des Arts et Métiers à Paris, pour qui veut mieux comprendre l'impact des activités humaines sur l'environnement. « Empreinte carbone, l'expo » jusqu'au 11 mai 2025, peut apprendre, et même aux plus jeunes, à réduire ladite empreinte.

Gros cube. Bonne surprise, il y a de quoi s'amuser avec ce sujet *a priori* austère. Pas seulement s'esbaudir devant cette quadruplette — tandem pour quatre cyclistes — qui se cachait dans les réserves du musée, mais jouer, par exemple, à un petit jeu très instructif. Construit autour de « notre menu idéal » et des émissions de GES qu'il induit, il consiste à empiler de simples pièces de bois de toutes couleurs et à l'épaisseur variée, qui correspondent à riz, quinoa, pâtes, jus de fruit, bonbons, etc. Attention au gros cube orange, c'est un steak qui pèse lourd… en émission de méthane ! Vous devriez avoir compris comment vous décarboner. ■

COURRIER

Courriels à : **courrier-lecteurs@sciencesetavenir.fr**

« GLP-1, la molécule miracle »
(*Sciences et Avenir* n° 931, septembre 2024)

Lectrice depuis de très nombreuses années de *Sciences et Avenir* et intéressée par les nombreux sujets que vous abordez, j'aimerais partager une interrogation qui m'est venue après la lecture de votre dossier. Quelles sont les connaissances que l'on a aujourd'hui sur les mécanismes humains de production des incrétines dont le GLP-1 ?

Bernadette Tavant

S. et A. : Ces hormones sécrétées par le tube digestif (comme le GLP-1 ou le GIP) sont produites par des cellules différentes situées respectivement dans le gros intestin et l'intestin grêle et sont très rapidement dégradées dans le sang. Le GLP-1 agit surtout sur les terminaisons nerveuses du nerf vague autour de l'intestin, avant de passer dans le sang. Le GLP-1 est aussi produit dans le cerveau par certains neurones, sous la forme d'un neurotransmetteur peptidique.

Réservoirs d'eau

Dans l'entretien avec Gonéri Le Cozannet, « Comment protéger le littoral de la montée des eaux » (*S. et A.* n° 931), il manque la solution de stocker le surplus de l'eau dans des réservoirs. Je suis convaincu que c'est une méthode simple et effective : quand le niveau d'eau augmente tellement que les rivières menacent de déborder, des réservoirs à côté de rivières accueillent les surplus d'eau. **Nico Kroese**

Gonéri Le Cozannet (chercheur au BRGM) : Au rythme actuel de l'élévation du niveau de la mer, ce sont environ 1500 milliards de mètres cubes d'eau qu'il faudrait stocker tous les ans pour compenser ce phénomène. Et tout cela sans résoudre les autres effets du changement climatique : canicules, pluies intenses, sécheresses, feux de forêt.

Sea Obiter

Dans le très intéressant dossier spécial sur les « 20 questions qui obsèdent les scientifiques » (*S. et A.* n° 929-930), j'ai lu l'article intitulé « L'océan austral sauvera-t-il le climat ? ». Vous décrivez le projet Polar Pod conçu par Jean-Louis Étienne. Mais, lorsque vous parlez d'innovation et d'« *idée folle* » de bateau vertical, il me semble que vous auriez dû rappeler qu'il y a déjà eu un projet de ce type avec le Sea Orbiter de Jacques Rougerie dans les années 2010. Il n'a malheureusement pas abouti.

Marie-Thérèse Ménager

S. et A. : En effet, le Sea Orbiter était un projet très ambitieux de vaisseau vertical. C'est intéressant de le rappeler. Néanmoins, ses caractéristiques et ses ambitions étaient très différentes. D'abord, il devait être doté de six ponts sous-marins alors que le Polar Pod ne prévoit aucun habitat sous-marin. Seule la nacelle perchée à environ dix mètres au-dessus du niveau de la mer sera occupée. Si le Sea Orbiter ambitionnait d'être un vaisseau d'exploration des océans, il n'avait pas été pensé pour affronter uniquement l'océan Austral comme Polar Pod.

La science, CQFD.
Natacha Triou
DU LUNDI AU JEUDI
16H – 17H
> Disponible sur le site et l'appli Radio France.

© Radio France/Ch. Abramowitz
En partenariat avec
SCIENCES ET AVENIR
france culture
L'esprit d'ouverture

BERNARD MARTINEZ

ÉDITO

Mathieu Nowak
Rédacteur en chef

Prenons le temps de rêver

Six heures et quarante-deux minutes. C'est la durée moyenne de sommeil des Français. Or, les experts recommandent sept à neuf heures. Une grande partie d'entre nous est donc en dette chronique de sommeil. Avec un effet négatif sur l'humeur, la mémoire, le moral. Mais aussi sur le risque de développer des maladies cardio-vasculaires, en premier lieu des AVC (*lire p. 66*), qui tuent en France près de dix fois plus que les accidents de la route (dont un cinquième est d'ailleurs lié à la somnolence). Fait beaucoup moins connu, les nuits trop courtes nous privent également de temps pour… rêver ! Or, le rêve est loin d'être un « passe-temps » plus ou moins agréable qui rendrait nos nuits moins ennuyeuses. C'est même une « *fonction capitale pour la survie* » nous dit Perrine Ruby, du Centre de recherche en neurosciences de Lyon (*p. 63*), qui nous permet de mieux vivre les situations les plus fortes émotionnellement. Environ la moitié d'entre nous ont par ailleurs vécu une expérience étonnante : vivre un rêve consciemment, en sachant que l'on dort et en parvenant à influer sur le scénario onirique. Un phénomène intrigant, connu depuis l'Antiquité, mais sur lequel les chercheurs ne se sont penchés que récemment. « *Lors de la dernière décennie, le rêve lucide s'est de plus en plus imposé dans la recherche* », affirme le neuroscientifique néerlandais Martin Dresler (*p. 56*). Ce qui a permis notamment de montrer qu'il est possible de communiquer avec une personne en train de rêver. Mieux, les scientifiques ont mis au point une recette pour atteindre cet état de conscience. Nous vous la livrons ce mois-ci. Pour quoi faire ? S'envoler, converser avec des personnalités, développer sa créativité (*p. 61*), ou même s'exercer à un sport d'adresse, c'est à vous de décider. De quoi convaincre ceux qui estiment encore que le sommeil est une perte de temps ? ■

Le rêve lucide est un phénomène connu depuis l'Antiquité, mais sur lequel les chercheurs ne se sont penchés que récemment

VOUS ÊTES ÉTUDIANT
ABONNEZ-VOUS DÈS MAINTENANT
profitez d'une remise exceptionnelle
en scannant ce QR code

SCIENCES ET AVENIR

SERVICE ABONNEMENT
et anciens numéros
Tél. : 01.55.56.71.48
Sciences et Avenir 45, avenue du Général-Leclerc 60643 Chantilly cedex
abonnements@sciencesetavenir.fr

Tarif des abonnements : France, 1 an simple (11 numéros dont un double) : 35 € 1 an complet (11 numéros dont un double + 4 hors-séries) : 48 €. Étranger : nous consulter.
Abonnements Belgique : Edigroup : tél. 00.32.70.233. 304
Abonnements Suisse : Edigroup : tél. 00.41.22.860.84.01

Pour joindre la rédaction :
41 bis, avenue Bosquet 75007 Paris
Tél. : 01.55.35.56.01.
E-mail : redaction@sciencesetavenir.fr
Site Internet : sciencesetavenir.fr

Directrice éditoriale Dominique LEGLU - 01.55.35.56.02
Rédacteur en chef Sciences et Avenir Mathieu NOWAK 01.55.35.56.38
Rédacteur en chef La Recherche Philippe PAJOT - 01.70.98.19.29
Rédacteur en chef digital Olivier LASCAR - 01.55.35.56.15

Rédaction en chef hors-série Vincent REA - 01.55.35.56.35
avec Florence LEROY - 01. 55.35.56.36
Adjoint à la rédaction en chef
Laurent PERICONE (édition) - 01.55.35.56.10
Rédacteur(trice)s en chef adjoint(e)s
Vincent GLAVIEUX (La Recherche) - 01.70.98.19.32
Hugo JALINIÈRE (Sciences et Avenir) - 01.55.35.56.52
Andreina DE BEI (photo) - 01.55.35.56.31
Lise LOUMÉ (digital) - 01.55.35.56.39
Directeur(trice)s artistiques Dominique PASQUET (couverture) - 01.55.35.56.59 - Jean-Louis GILABERT - 01.55.35.56.28
Thalia STANLEY (adjointe) - 01.55.35.56.21
Secrétaire générale de la rédaction
Véronique MESSAGER - 01.55.35.56.18
Conseillère auprès de la rédaction en chef
Rachel MULOT (cheffe de service enquêtes) - 01.55.35.56.07
Chef de service Fabrice NICOT (fondamental) - 01.55.35.56.46
Chef de service adjoint Hervé RATEL (actualités) - 01.55.35.56.45
Chef(fe)s de rubrique Franck DANINOS (fondamental) - 01.55.35.56.78 Mathias GERMAIN (biologie, médecine, santé) - 01.70.98.19.33 Sylvie RIOU-MILLIOT (médecine, santé) - 01.55.35.56.54
Rédaction Marine BENOIT (archéologie, histoire) - 01.55.35.56.23
Arnaud DEVILLARD (numérique, expositions) - 01.55.35.56.27
Sylvie ROUAT (grand reporteure, espace, océanologie) - 01.55.35.56.40
Assistante de direction Valérie PELLETIER - 01.55.35.56.01
Collaborateurs(trices) Sylvie BOISTARD, Loïc CHAUVEAU, Johan KIEKEN
Chroniqueurs Sylvie BENZONI-GAVAGE, Christophe CASSOU, Jean-Gabriel GANASCIA, Céline GUIVARCH, Claire MATHIEU
Ont participé à ce numéro P. BERLOQUIN, A. CARLIEZ, C. COUMAU, O. DAILLET, N. GUTIERREZ C., G. JACQUEMONT, P. KALDI
1re secrétaire de rédaction Sandrine HAGÈGE - 01.55.35.56.17
Photo-iconographie Isabelle TIRANT - 01.55.35.56.32
Claire BALLADUR - 01.70.98.19.41
Pôle digital Valentin COLLIAT-DANGUS (community manager) - 01.55.35.56.70, Isabelle DO O'GOMES (cheffe de rubrique, veille) - 01.55.35.56.49, Camille GAUBERT (santé) - 01.55.35.56.24, Joël IGNASSE (espace, paléontologie) - 01.55.35.56.15, Coralie LEMKE (santé) - 01.55.35.56.56, Astrid SAINT AUGUSTE (rédactrice spécialisée) - 01.55.35.56.48, Anne-Sophie TASSART (cheffe de rubrique) - 01.55.35.56.41
Jessica RIOS responsable projets digitaux - Yann BOURDAIS chef de projet junior - Flora ISSINGUI cheffe de projet marketing digital
Courrier des lecteurs
Sara DE LACERDA - courrier-lecteurs@sciencesetavenir.fr
Informatique Daniel DE LA REBERDIÈRE - 01.55.35.56.06
Responsable administrative et financière Jaye REIG - jreig@challenges.fr
Comptabilité - compta@challenges.fr
Responsable ressources humaines William AFTHONIADES - wafthoniades@challenges.fr
Responsable paye Sandrine MARTIN - smartin@challenges.fr
Fabrication Sarah RABBAH
Publicité MediaObs 44, rue Notre-Dame-des-Victoires 75002 Paris Tél. : 01.44.88.97.70. Fax : 01.44.88.97.79.
Directrice générale Corinne ROUGÉ - 01.44.88.93.70 - assistée de Marie-Noëlle MAGGI - 01.44.88.93.70
Directrice de publicité Caroline GILLES - 01.44.88.89.03
Exécution : Emilien RIGNOLS - 01.44.88.89.05
Administration des ventes Catherine FERNANDES - 01.44.88.89.20
Directeur commercial Valéry SOURIEAU
Directeur des abonnements Luc BONARDI
Responsable des abonnements Lina QUACH - 01.55.35.56.63
Partenariats et événements – Alain SCEMAMA - 01.58.65.03.58

Les Éditions Croque Futur
Président, directeur de la publication Claude PERDRIEL
Directeur général Philippe MENAT
Directeur éditorial Maurice SZAFRAN
Secrétaire général Jean-Claude ROSSIGNOL

Origine du papier : Allemagne - Taux de fibres recyclées : 0 %
Eutrophisation : PTot = 0,018 kg/tonne de papier
Ce magazine est imprimé chez Roto France (Lognes), certifié PEFC

Certifié PEFC
Ce produit est issu de forêts gérées durablement et de sources contrôlées.
PEFC 10-31-1557 pefc-france.org
FR
ACPM DIFFUSION

Les noms et adresses de nos abonnés seront communiqués aux organismes liés contractuellement avec *Sciences et Avenir*, sauf opposition. Dans ce cas, la communication sera limitée au service de l'abonnement.Ce numéro comporte une lettre de « bienvenue aux abonnés », les encarts « Sophia Boutique - Atlas Historique du Ciel » et « First Voyages » jetés sur couverture sur une partie de la diffusion abonnés, ainsi que les encarts « L'Homme Moderne » et « Restos du Coeur » et le message « Sciences et Avenir » jetés sur couverture sur la totalité de la diffusion abonnés.
Commission paritaire n° 0625 K 79712.
ISSN 3040-0457. Distribué par MLP.

La Poste – SA au capital de 5 857 785 892 € – 356 000 000 RCS Paris – Siège social : 9, rue du Colonel Pierre Avia 75015 Paris.

Être postière, c'est aussi vous livrer en vélo cargo.

Grâce à ses 32 831 véhicules électriques,
La Poste vous assure chaque jour
des livraisons plus durables.

La Poste. Ça crée des liens entre nous.

Source : Résultats semestriels 2024 du groupe La Poste.
Retrouvez tous nos engagements RSE sur www.lapostegroupe.com/fr/notre-engagement-societal.

SOMMAIRE

Sciences et Avenir / N° 933 / Novembre 2024

DOSSIER P. 54

Prendre le contrôle de ses rêves

Voler comme Superman, s'entraîner à un sport… tout en dormant ! C'est possible grâce à la technique du rêve lucide, avec laquelle on parvient à maîtriser les événements de son sommeil. Un état de conscience très particulier qui fait l'objet d'études scientifiques pointues et révèle des effets surprenants.

5 **Éditorial** par Dominique Leglu
6 **Courrier**
7 **Édito** par Mathieu Nowak

PRIX NOBEL
10 **Les lauréats 2024**

SCIENCES FONDAMENTALES
14 **ACTUALITÉS** La Terre aurait possédé des anneaux / L'ESA inaugure sa lune d'entraînement
30 **Neutrons : un accélérateur pour explorer la matière**
35 **Déviation d'astéroïde : l'enquête se poursuit**
38 **Journal de l'IA : Éduquer les modèles de langage**

NATURE
16 **ACTUALITÉS** Un cataclysme inédit au Groenland / Un cratère d'impact géant en Australie
40 **Colombie : la guerre de l'eau est déclarée**
46 **Notre avenir passe par les algues**

SANTÉ
20 **ACTUALITÉS** L'effet yo-yo accentue le risque cardiaque / Voici la première prothèse magnétique
54 **Rêve lucide : prenez le contrôle de vos nuits**
66 **AVC : agir vite pour le cerveau**
78 **Nutrition : La pomme de terre sous toutes ses formes**

HISTOIRE
24 **ACTUALITÉS** Le capitaine cannibalisé de l'expédition Franklin / Des momies révèlent l'origine du kéfir
80 **Bibracte, la ville gauloise n'a pas livré tous ses secrets**
86 **Histoire des sciences : La renaissance de la cosmologie**

TRANSVERSALES
90 **Sélection livres**
93 **Expositions**
94 **Chroniques**
Climat par Christophe Cassou et Céline Guivarch / Mathématiques par Claire Mathieu / Éthique par Jean-Gabriel Ganascia / L'œil d'Olivier Lascar
96 **Questions de lecteurs**
97 **Le ciel de décembre**
98 **Jeux**

P. 30

Neutrons : un accélérateur va explorer la matière

L'European Spallation Source en construction dans le sud de la Suède deviendra l'une des plus puissantes « usines à neutrons » du monde. Reportage.

P. 66

AVC : agir vite pour le cerveau

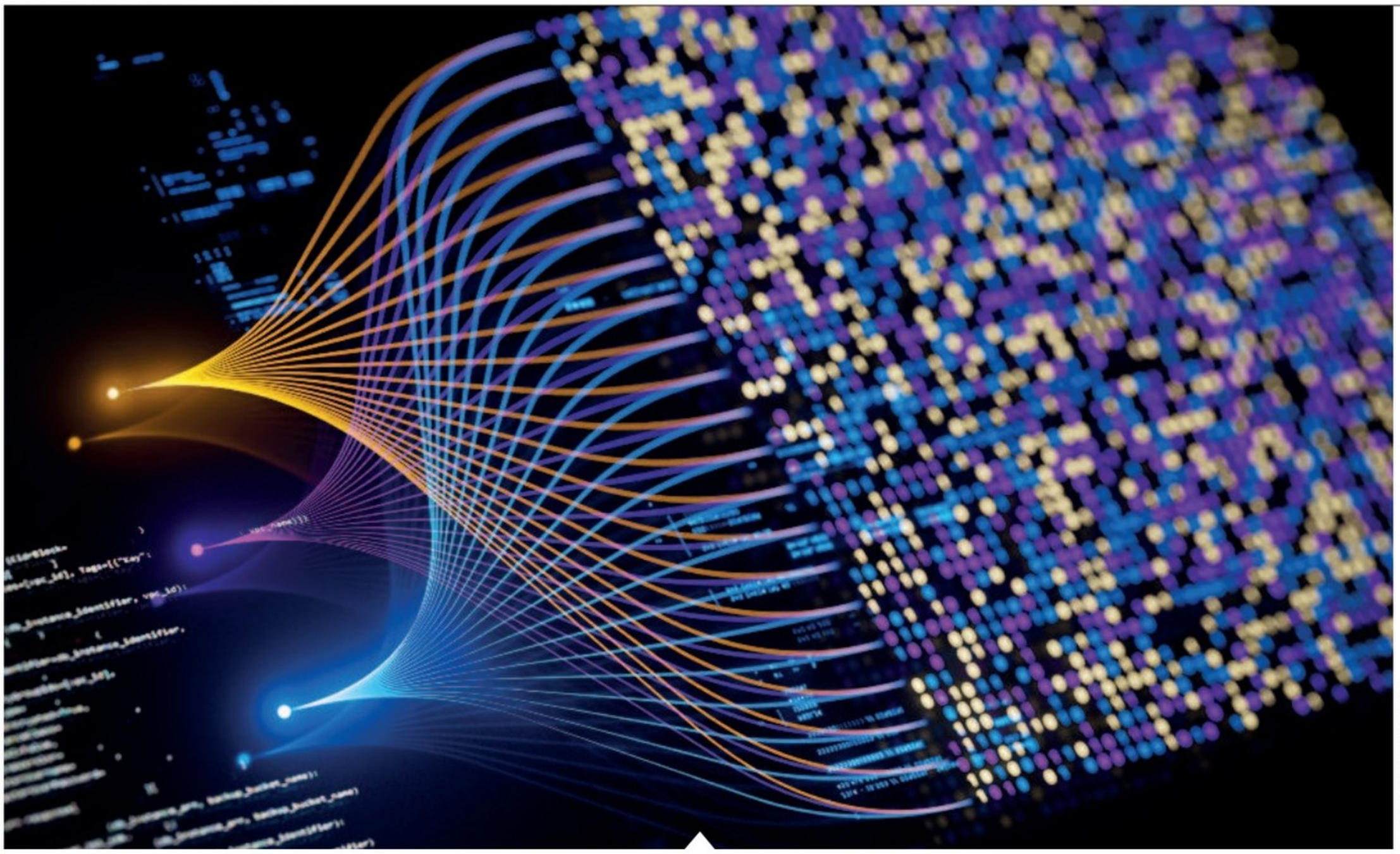
Afin d'administrer au plus tôt des traitements et ainsi éviter des séquelles lourdes, les spécialistes insistent sur la sensibilisation aux signes avant-coureurs de l'accident vasculaire cérébral.

P. 80

Bibracte la gauloise n'a pas livré tous ses secrets

Au cœur du Morvan, l'une des villes gauloises les plus importantes est fouillée depuis 40 ans. Le site témoigne du dynamisme politique et de la puissance militaire du peuple celte des Éduens.

SÉBASTIEN PLASSART / COSTUME3PIÈCES POUR SCIENCES ET AVENIR - EMMANUEL DUNAND / AFP - **BRUNO BOURGEOIS** - BIBRACTE, ANTOINE MAILLIER



JUST SUPER/ GETTY IMAGES

Les chercheurs ont utilisé des concepts et méthodes de la physique statistique pour concevoir des réseaux de neurones artificiels.

PHYSIQUE

L'intelligence artificielle à l'honneur

L'Académie royale des sciences de Suède couronne les travaux fondamentaux menés par les deux chercheurs dans le domaine de l'apprentissage automatique, le « deep learning ».

Geoffrey Hinton était dans un hôtel californien bon marché disposant d'une mauvaise connexion à Internet, s'apprêtant à honorer un rendez-vous pour une IRM, quand il a compris qu'il allait devoir changer ses plans. Prévenu par téléphone par l'Académie royale des sciences de Suède, cet Anglo-Canadien a reçu le prix Nobel de physique avec John Hopfield pour ses travaux sur les réseaux de neurones, l'apprentissage automatique et l'intelligence artificielle (IA), celle que l'on appelle « deep learning ».

Stupéfaction dans la communauté scientifique : un prix Nobel de physique… sans physique ? « *J'avoue être assez surpris par cette nouvelle… Le* machine learning *est bien un véritable melting-pot scientifique !* », témoigne ainsi Cyril Furtlehner, chargé de recherche à l'Institut national de recherche en sciences et technologies du numérique (Inria), à Saclay. « *C'est étonnant que cette découverte majeure soit saluée par un prix de physique,* abonde Patrick Gallinari, professeur à l'Institut des systèmes intelligents et de robotique, à Sorbonne Université. *Mais en même temps, à la création du prix Nobel, il n'y avait pas encore d'informatique…* »

PRINCETON UNIVERSITY ; UNIVERSITY OF TORONTO

Les lauréats
(de gauche à droite)

John Hopfield, 91 ans, université Princeton (États-Unis).
Geoffrey Hinton, 76 ans, université de Toronto (Canada).

En réalité, la physique est loin d'être absente de leurs travaux, même si ceux-ci ont abouti à des applications qui dépassent largement son cadre. Au début des années 1980, les deux chercheurs ont commencé à recourir aux méthodes de la science physique pour les appliquer au traitement de données en s'inspirant de la structure du cerveau. Biophysicien et spécialiste de physique statistique, John Hopfield avait proposé à l'époque un type de réseaux de neurones artificiels connectés entre eux, grossièrement comparables aux synapses, et que l'on a appelé « réseau de Hopfield ».

À l'origine de l'IA générative actuelle

Si on modélise les neurones de manière très grossière, ils peuvent être dans deux états. Soit ils sont actifs et vont émettre un signal électrique, soit ils sont éteints et n'émettent rien du tout. Leur état d'activation évolue en permanence et dépend des interactions avec les neurones environnants et d'autres régions cérébrales. Rémi Monasson, directeur de recherche CNRS au Laboratoire de physique théorique de l'École normale supérieure et professeur à l'École polytechnique, qui a déjà travaillé avec John Hopfield, indique que « *cette caricature n'est pas mauvaise… même si le phénomène réel est bien plus complexe que cela, car intrinsèquement dynamique. John Hopfield l'a simplifié en supposant que les interactions entre neurones sont symétriques.* »

L'apport de Geoffrey Hinton consiste en une méthode d'apprentissage pour un réseau de neurones, la rétropropagation du gradient, qui affine les poids de chaque neurone au fil du processus d'apprentissage. La voie ouverte par John Hopfield et Geoffrey Hinton, longtemps considérée comme une impasse, a permis de relancer l'intérêt pour la recherche en IA, en l'occurrence l'IA statistique, par opposition à l'IA symbolique, fondée sur des règles explicites.

L'IA générative actuelle, qui repose sur les réseaux transformers, est une héritière directe de ces recherches. Et c'est d'ailleurs en raison de ses inquiétudes grandissantes sur ce qui pourrait être fait de ces technologies que Geoffrey Hinton a quitté Google, où il travaillait en parallèle de son poste universitaire, en 2023. « *Nous n'avons jamais connu de situation où des choses deviennent plus intelligentes que nous* », lance-t-il en guise d'avertissement. ■

Alice Carliez et Arnaud Devillard

CHIMIE

La structure des protéines n'a plus de secret pour l'IA

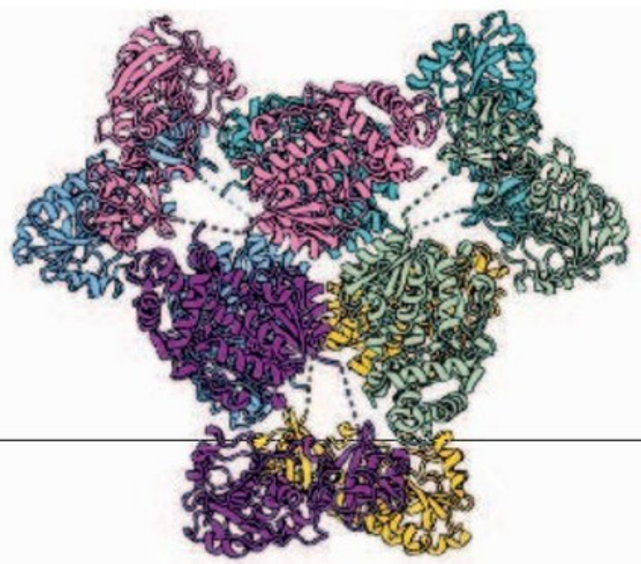
Après les fondements de l'IA moderne distingués par le Nobel de physique, l'Académie récompense une application directe de l'IA sur l'étude des protéines.

C'est la résolution d'un casse-tête de la biochimie qu'a récompensée le comité Nobel : celui de la prédiction de la structure des protéines. Autrement dit, savoir, à partir d'un gène codant une protéine, quelle forme tridimensionnelle celle-ci adoptera. Une prouesse réalisée grâce à la puissance de calcul de l'intelligence artificielle. Celle du logiciel AlphaFold2 de Google DeepMind codéveloppé par le Britannique Demis Hassabis, directeur général de DeepMind, et l'Américain John M. Jumper.

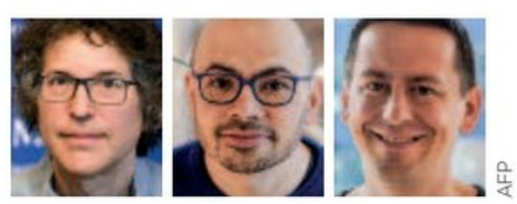
Jusqu'ici, l'information contenue dans un gène ne permettait d'obtenir que la structure primaire, dépliée, d'une protéine. En aucun cas, la forme tridimensionnelle que celle-ci va adopter. Mais une protéine n'est efficace, ou pas, que par la structure tertiaire qu'elle prend et qui dépend des interactions entre les centaines, voire les milliers, de briques qui la composent, les acides aminés. Or les protéines sont les véritables chevilles ouvrières des processus biologiques : elles régulent toute l'activité métabolique, activent ou inhibent les transmissions, modifient la vitesse des réactions chimiques, structurent les cellules…

Pour donner une idée de l'ampleur du défi relevé par AlphaFold2, rappelons qu'au début des années 1970, Cyrus Levinthal, un biologiste moléculaire américain, ▶

T. KOVALOVA/THE ROYAL SWEDISH ACADEMY OF SCIENCES



Le logiciel AlphaFold2 permet de connaître la structure 3D d'une protéine, et ainsi sa fonction (ici, une enzyme bactérienne causant l'antibiorésistance).



AFP

Les lauréats
(de gauche à droite)

David Baker, 62 ans, université de Washington (États-Unis).
Demis Hassabis, 48 ans, Google DeepMind (Royaume-Uni).
John Jumper, 39 ans, Google DeepMind (États-Unis).

avait calculé que même une petite protéine d'une centaine d'acides aminés pouvait prendre au moins 10^{47} formes différentes, soit 100 milliards de milliards de milliards de milliards! Et la plus grosse protéine connue chez l'être humain, la connectine, ne compte pas moins de 30 000 acides aminés… Avec AlphaFold2, Demis Hassabis et John Jumper ont ainsi calculé la structure des quelque 100 000 types de protéines humaines. Sur leur lancée, ils ont prédit celles des 200 millions de protéines de tous les organismes vivants qui peuplent notre planète.

Concevoir des protéines inédites

La seconde moitié du prix Nobel de chimie récompense une découverte différente mais intimement liée. L'Américain David Baker a, lui, mis à profit la puissance de l'outil informatique pour concevoir des protéines inédites, qui n'existent pas dans la nature et pourvues de nouvelles fonctions. Comme celle capable de détecter des traces de fentanyl dans l'air (2017), des nanoparticules imitant le virus du rhume et pouvant être utilisées comme vaccins (2021), ou d'autres changeant de forme selon les conditions environnementales pour servir de détecteurs (2024)… Et la révolution biochimique n'est pas près de s'arrêter. En mai, Google DeepMind a annoncé la sortie d'AlphaFold3, capable de prédire la structure et les interactions des protéines avec notamment l'ADN et l'ARN. Vertigineux! ■

Hervé Ratel

MÉDECINE

La régulation génétique par les micro-ARN

Les deux chercheurs américains ont identifié les mécanismes qui permettent à la cellule de produire les protéines spécialisées.

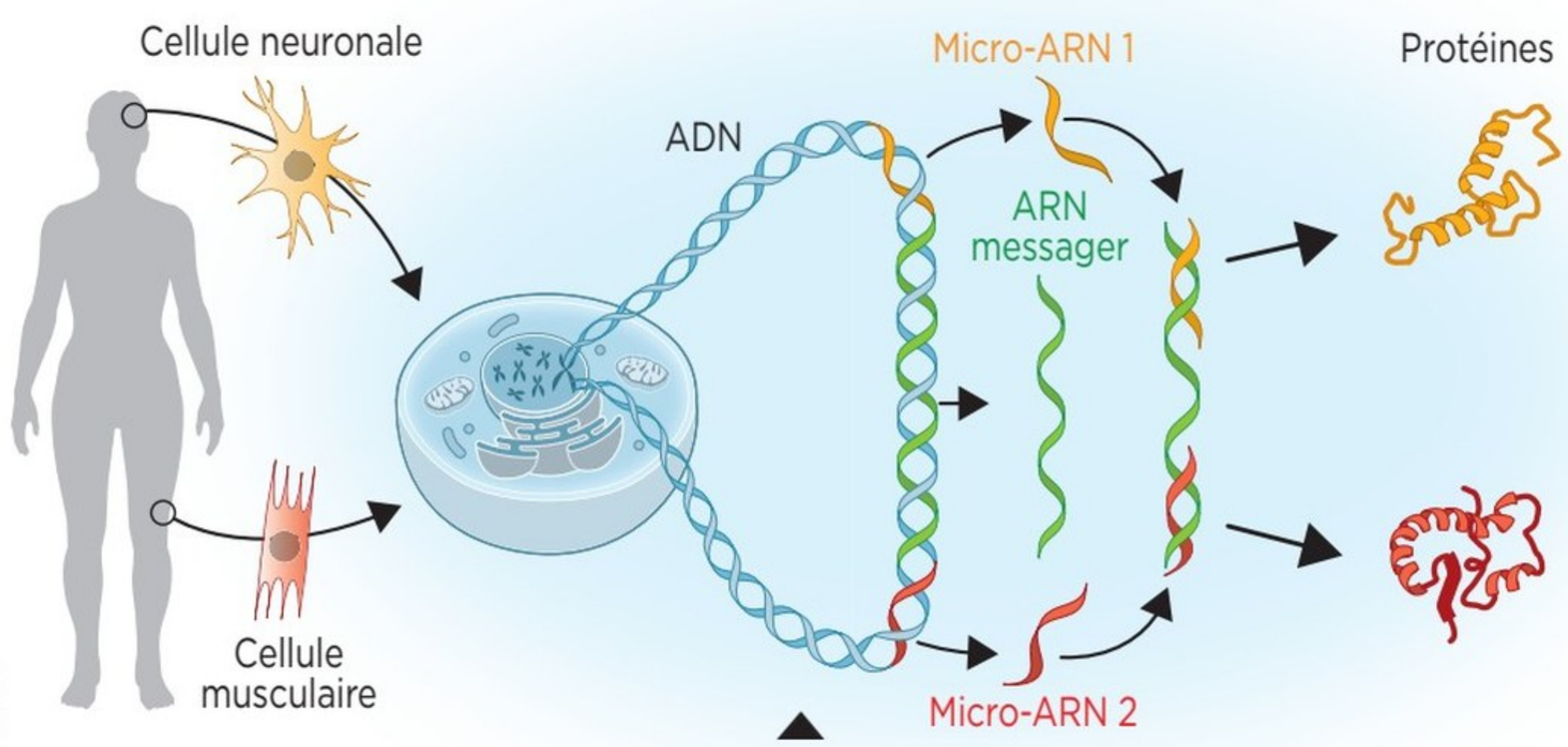
En faisant la découverte des micro-ARN en 1993 qui leur vaut aujourd'hui le prix Nobel de médecine, les Américains Victor Ambros et Gary Ruvkun ont résolu l'un des grands mystères de la génétique. En effet, toutes les cellules d'un organisme possèdent en leur noyau le même ADN, avec les mêmes gènes, et donc théoriquement les mêmes instructions pour fabriquer l'ensemble des protéines nécessaires au bon fonctionnement de l'organisme en question. Pourtant, celui-ci est composé de différents types cellulaires aux fonctions très variées. Les cellules du foie n'ont pas le même rôle que celles du muscle cardiaque, pas plus

AFP

Les lauréats
(de gauche à droite)
Victor Ambros, 70 ans, UMass Chan Medical School, université du Massachusetts (États-Unis).
Gary Ruvkun, 72 ans, Harvard Medical School (États-Unis).

que les neurones qui assurent la transmission de signaux bioélectriques n'ont à voir avec les cellules du pancréas produisant l'insuline…
Qui régule donc l'expression génétique propre à chaque type cellulaire? Les micro-ARN! De tout petits morceaux de code génétique qui inactivent l'information génétique inutile en fonction de la localisation de la cellule. Ils viennent pour cela se lier aux ARN messagers, les plans de fabrication des protéines, copies transitoires de l'ADN du noyau. Les micro-ARN sont ainsi impliqués à de multiples stades du développement et, chez l'humain, ont été dès 2009 mis en évidence comme déclencheurs de maladies. Nombre de travaux sont ainsi en cours pour développer des tests diagnostiques et des solutions thérapeutiques à base de micro-ARN pour des cancers, des maladies cardiovasculaires, des troubles métaboliques ou des maladies neurodégénératives. ■

H. R.



Les différents types cellulaires (neurone, muscle, etc.) hébergent le même ADN. Les micro-ARN produisent des protéines spécialisées en fonction du rôle de chaque cellule.

LIMICOL®

L'EFFICACITÉ PROUVÉE CONTRE LE CHOLESTÉROL

Le **premier et le seul** complément alimentaire ayant obtenu une allégation de santé exclusive par l'Union Européenne.*

BÉNÉFICE SANTÉ VALIDÉ par les autorités européennes

PROUVÉ CLINIQUEMENT

-20%

DE LDL-CHOLESTÉROL DÈS 1 MOIS[1]

FORMULE BREVETÉE

ACTIFS NATURELS ET VITAMINES

Levure de riz rouge

Extrait d'ail

Extrait d'artichaut

Votre accompagnement anticholestérol et une **OFFRE AVANTAGEUSE** à découvrir ici

Nos expertes en micronutrition vous conseillent, 6j/7. Contactez-nous au : 05 46 56 30 48

laboratoire-lescuyer.com | FORMULATION ET FABRICATION FRANÇAISES

Complément alimentaire à base de monacoline K issue de levure de riz rouge, extraits de plantes et vitamines. Ne doit pas être consommé par les femmes enceintes ou allaitantes, les enfants de moins de 18 ans et les adultes de plus de 70 ans. Si vous avez des problèmes de santé, demandez conseil à votre médecin avant de consommer ce produit.Ne doit pas être consommé en cas de prise de médicaments pour réduire le cholestérol ou si vous consommez déjà d'autres produits contenant de la levure de riz rouge. Ne pas dépasser la dose journalière recommandée (ne pas consommer plus de 3 mg de monacolines par jour). À tenir hors de portée des jeunes enfants. Ne se substitue pas à une alimentation variée, équilibrée et à un mode de vie sain. Plus d'informations sur **www.laboratoire-lescuyer.com**. *La combinaison d'actifs de Limicol® réduit les concentrations de cholestérol LDL dans le sang. Une cholestérolémie LDL élevée constitue un facteur de risque dans le développement des maladies coronariennes. Il existe d'autres facteurs de risque qu'il est également important de surveiller. La modification de l'un de ces facteurs peut ou non avoir un effet bénéfique. Ce produit est destiné aux personnes devant contrôler leur taux de cholestérol sanguin. 1 - Réduction moyenne observée lors de 3 études cliniques réalisées sur un total de 184 sujets âgés de 18 à 65 ans, présentant une hypercholestérolémie non traitée : Ogier et al. Eur J Nutr 2013 ; Barrat et al. Int J Food Sci Nutr. 2013 ; Barrat et al. Eur J Nutr 2013

Les nombreuses chutes de météorites produites sur notre planète proviendraient d'un système d'anneaux (vue d'artiste).

OLIVER HULL

La Terre aurait possédé des anneaux

Cette hypothèse audacieuse se fonde sur une analyse du nombre important de cratères de météorites situés autour de l'équateur terrestre, datant d'environ -450 millions d'années.

À l'instar de Saturne, la Terre avait peut-être des anneaux il y a plus de 450 millions d'années. C'est en analysant les caractéristiques de très vieux cratères qu'une équipe de l'université Monash (Australie) a proposé cette fascinante théorie. Ces dernières années, d'autres chercheurs avaient déjà identifié d'importants flux de micrométéorites dans les roches de l'ordovicien moyen (de -470 à -458 millions d'années). Le taux de cratérisation présentait par ailleurs un pic abrupt vers -466 millions d'années, tout comme les dépôts produits par de nombreux tsunamis. Autant de signes d'un événement céleste majeur.

Pour enquêter sur sa nature, l'équipe a retracé l'évolution de 21 cratères d'impact de l'ordovicien moyen, notamment en Australie, en Europe et en Chine. Grâce à des simulations reproduisant la dérive des continents, elle a déterminé ainsi leur localisation d'origine. Or, ils se situent tous à des latitudes inférieures à 30° — soit une bande relativement étroite centrée autour de l'équateur. Un résultat pour le moins surprenant sachant que les météorites ont statistiquement autant de chance de tomber partout sur notre planète. La probabilité pour que cette répartition soit le fruit d'un hasard serait ainsi de 1 sur 25 millions, ont calculé les chercheurs.

D'où l'hypothèse que ces cratères d'impact — et les chutes de météorites qui les ont engendrés — résultent d'un système d'anneaux.

Des débris de 12 km de large environ

Que ce soit sur Saturne, Jupiter, Uranus ou Neptune, ces structures composées de myriades de débris rocheux se forment toujours au niveau des équateurs planétaires. Mais comment ce disque serait-il lui-même apparu? Les chercheurs l'expliquent par la capture gravitationnelle d'un astéroïde de plus de 10 km de diamètre dans une orbite basse équatoriale: à seulement 3000 voire 15000 km de la Terre, en fonction de la densité éventuelle du corps rocheux. À de si petites distances, les forces de marée auraient ainsi disloqué le bolide, produisant un anneau de débris d'environ 12 km de large.

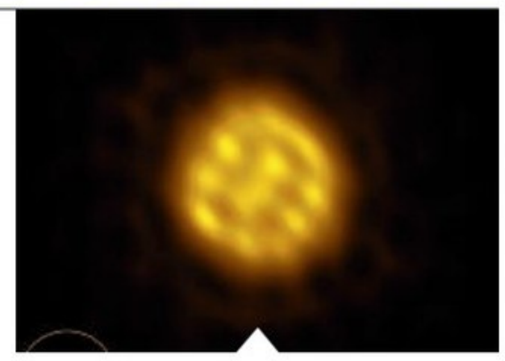
C'est une « *hypothèse très séduisante* », commente Pierre Rochette, du Centre de recherche et d'enseignement des géosciences de l'environnement. Mais les arguments sont encore trop ténus. Il faudrait découvrir et analyser d'autres cratères de l'ordovicien moyen sur « *les continents aux hautes latitudes telles l'Afrique et l'Amérique du Sud* », précise le géologue. Les mécanismes expliquant la capture d'un tel astéroïde ne sont, en outre, pas encore assez étayés. D'autres éléments de preuve seront donc nécessaires avant de définitivement parer la Terre d'un système d'anneaux. ■ **F. D.**

L'ESA inaugure sa lune d'entraînement

L'Agence spatiale européenne a lancé un nouveau dispositif de simulation lunaire au réalisme saisissant.

Un terrain d'exercice pour les futures missions sur la Lune a été installé dans un nouveau bâtiment du centre d'entraînement des astronautes européens à Cologne, en Allemagne *(photo ci-contre)*. Baptisé Luna, ce dispositif de simulation lunaire plus vrai que nature offre un espace de 700 m² recouverts de 900 tonnes de grains et de roches volcaniques traités pour simuler le régolithe lunaire. Avec Luna, les astronautes peuvent aussi expérimenter la gravité réduite de notre satellite, environ six fois plus faible que sur Terre. Un câble, reliant le scaphandre à un chariot se déplaçant sur un rail au plafond, permet en effet de les alléger. Ingénieurs et scientifiques testent ainsi dans des conditions réalistes des équipements, robots, véhicules d'exploration et toutes autres technologies destinées aux missions lunaires. **S. R.**

DLR/ESA



ALMA W. VLEMMINGS ET AL.

Les bulles de gaz à la surface de R Doradus saisies par le radiotélescope Alma.

Premier film d'une autre étoile que le Soleil

ASTRONOMIE Grâce à une série de clichés pris par le radiotélescope Alma (Chili), des astronomes ont réalisé pour la première fois une séquence animée montrant des bulles de gaz à la surface de l'étoile R Doradus. Un tel film a été possible car l'étoile mesure 350 fois le diamètre du Soleil, et elle est « proche » de nous, à 180 années-lumière. **F. N.**

SOURCE : WOUTER VLEMMINGS, UNIVERSITÉ TECHNOLOGIQUE DE CHALMERS, SUÈDE.

23 MILLIONS D'ANNÉES-LUMIÈRE

La taille record des jets d'un trou noir

ASTROPHYSIQUE Plus de 200 fois le diamètre de la Voie lactée, c'est la taille record des deux jets de matière jaillissant de part et d'autre d'un trou noir supermassif. Ils constituent un monstrueux « rot » émis par le trou noir après l'ingestion de l'équivalent de 850 millions de soleils. Une superstructure baptisée Porphyrion, en hommage au Géant de la mythologie grecque. **F. N.**

SOURCE : MARTIJN OEI, INSTITUT DE TECHNOLOGIE DE CALIFORNIE, ÉTATS-UNIS

Un étrange caillou zébré découvert sur Mars

GÉOLOGIE Perseverance, le rover de la Nasa qui sillonne la planète Rouge depuis 2021, a repéré *« un rocher rayé noir et blanc comme aucun autre observé sur Mars auparavant » (photo ci-dessous)*, a annoncé l'agence spatiale américaine. La roche zébrée d'environ 20 cm de diamètre a été baptisée « Freya Castle », du nom d'un sommet situé en Arizona (États-Unis). Outre sa composition mystérieuse, il reste à trouver d'où elle vient, puisqu'elle est différente du sol sur lequel elle repose. **A.-S. T.**

NASA/JPL-CALTECH/ASU

ELSA GIRAUDAT

Le réseau des poches magmatiques sur 10 km de profondeur vu en 3D.

Dans les entrailles de la Soufrière

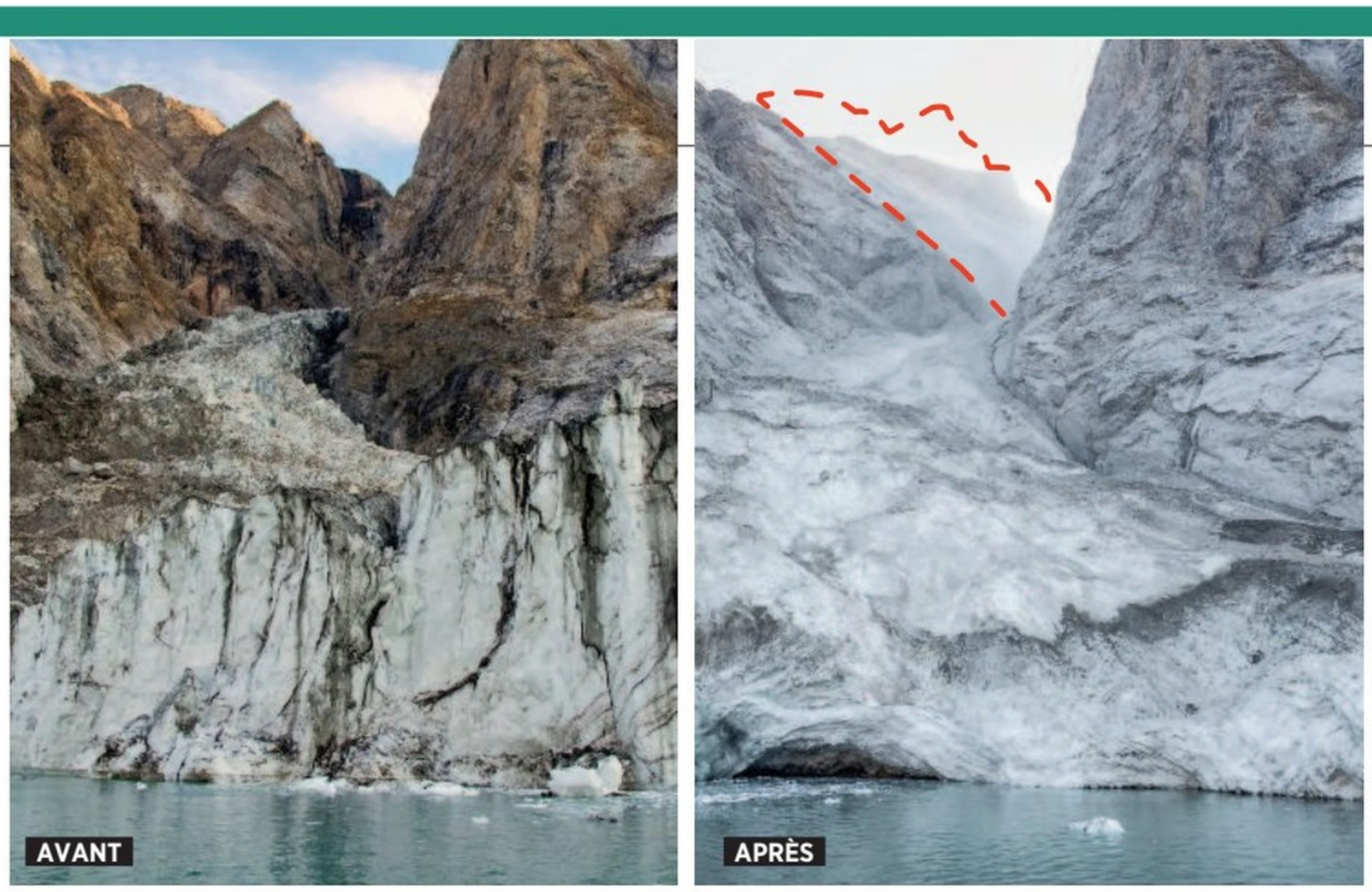
VOLCANOLOGIE Des chercheurs français ont réussi à imager en 3D, avec une précision de l'ordre d'une centaine de mètres, le réseau de poches de magma qui composent jusqu'à 10 km de profondeur la structure interne du volcan de la Soufrière, en Guadeloupe. Ils ont utilisé pour cela un réseau de géophones enregistrant les vibrations engendrées par les séismes, mais aussi par le vent, l'océan et l'activité humaine. **S. R.**

SOURCE : ELSA GIRAUDAT, CNRS, FRANCE.

-3,6 %

La baisse des émissions de gaz à effet de serre en France

CLIMATOLOGIE La première moitié de l'année 2024 a vu une baisse des émissions de gaz à effet de serre de 3,6 % par rapport à la même période de 2023 selon le Citepa, organisme indépendant chargé de récolter ces données. Un chiffre qui témoigne d'un ralentissement de la réduction des émissions. En 2023 en effet, une baisse de 5,8 % avait été enregistrée. **H. J.**



S.RYSGAARD, D.ARMY / E.KOBEL, KIT

Une partie de la montagne et du glacier a chuté dans le fjord Dickson (à droite).

Un cataclysme inédit au Groenland

Un immense glissement de terrain a provoqué un tsunami de 200 m de haut et déclenché un signal sismique mondial d'une durée exceptionnelle.

Le 16 septembre 2023, en milieu de journée, un mystérieux signal sismique a fait trembler les sismographes du monde entier, et ce pendant neuf jours ! Intrigués, 68 scientifiques de 15 pays ont mené l'enquête durant près d'un an, dont ils viennent de publier le résultat dans *Science*. L'origine de l'intrigant séisme a été localisée dans le fjord Dickson sur la côte est du Groenland. Les relevés satellitaires ont révélé qu'un énorme pan d'une montagne culminant à 1200 mètres d'altitude s'était décroché et avait dévalé le couloir du fjord sur plus de 2,2 kilomètres avant d'aboutir dans l'eau. Dans sa course, ce volume colossal de roches, équivalant à celui de 10 000 piscines olympiques, a aussi glissé sur le glacier au fond du fjord et arraché 13 mètres de son épaisseur de glace. Le choc de cette avalanche glacio-rocheuse dans la mer a entraîné un tsunami de 200 mètres de hauteur, puis des vagues de 110 mètres qui avaient encore 4 m de haut à 70 kilomètres de là sur la côte. Sur le terrain, les chercheurs ont constaté la disparition de sites archéologiques inuits et d'une hutte de trappeur vieille d'un siècle.

Le fort amincissement du glacier en cause

La modélisation du cataclysme leur a permis de montrer que le signal sismique régulier, de forte amplitude et diminuant lentement, était dû à l'oscillation des masses d'eau déplacées contre les fonds marins. Ce phénomène, appelé seiche, explique le type particulier de séisme enregistré sur neuf jours. De tels effondrements massifs sont rares mais semblent apparaître plus souvent au Groenland, les précédents les plus notables s'étant produits en 1952, 2017 et 2021. L'origine de celui de 2023 serait liée au fort amincissement du glacier à la base de la montagne observé ces dernières décennies. « *Nous allons explorer les chroniques sismologiques de ces 20 dernières années au Groenland pour tenter de retrouver les signatures typiques de ces glissements de terrain, et déterminer s'ils deviennent effectivement plus fréquents avec le réchauffement climatique* », annonce Clément Hibert, l'un des auteurs de l'étude et membre de l'institut Terre et environnement de Strasbourg. ■ **P. K.**

JEAN LECOMTE / BIOSPHOTO

Un moustique-tigre porteur de la dengue en France

ENTOMOLOGIE Pour la première fois, des chercheurs sont parvenus à identifier un moustique-tigre *(Aedes albopictus)* porteur du virus de la dengue en France métropolitaine. L'insecte avait été piégé dans la Drôme près du domicile de deux personnes infectées, confirmées comme « cas autochtones », c'est-à-dire n'ayant pas voyagé dans une zone où la maladie est présente. Les données génétiques du virus ont permis de le relier aux souches responsables de l'épidémie de 2023-2024 dans les îles françaises des Caraïbes. **H. J.**

SOURCE : BARBARA VIGINIER, INRAE, FRANCE.

ELLE A DIT

« Le bon usage des ressources est l'un des enjeux de recherche les plus importants pour les prochaines décennies »

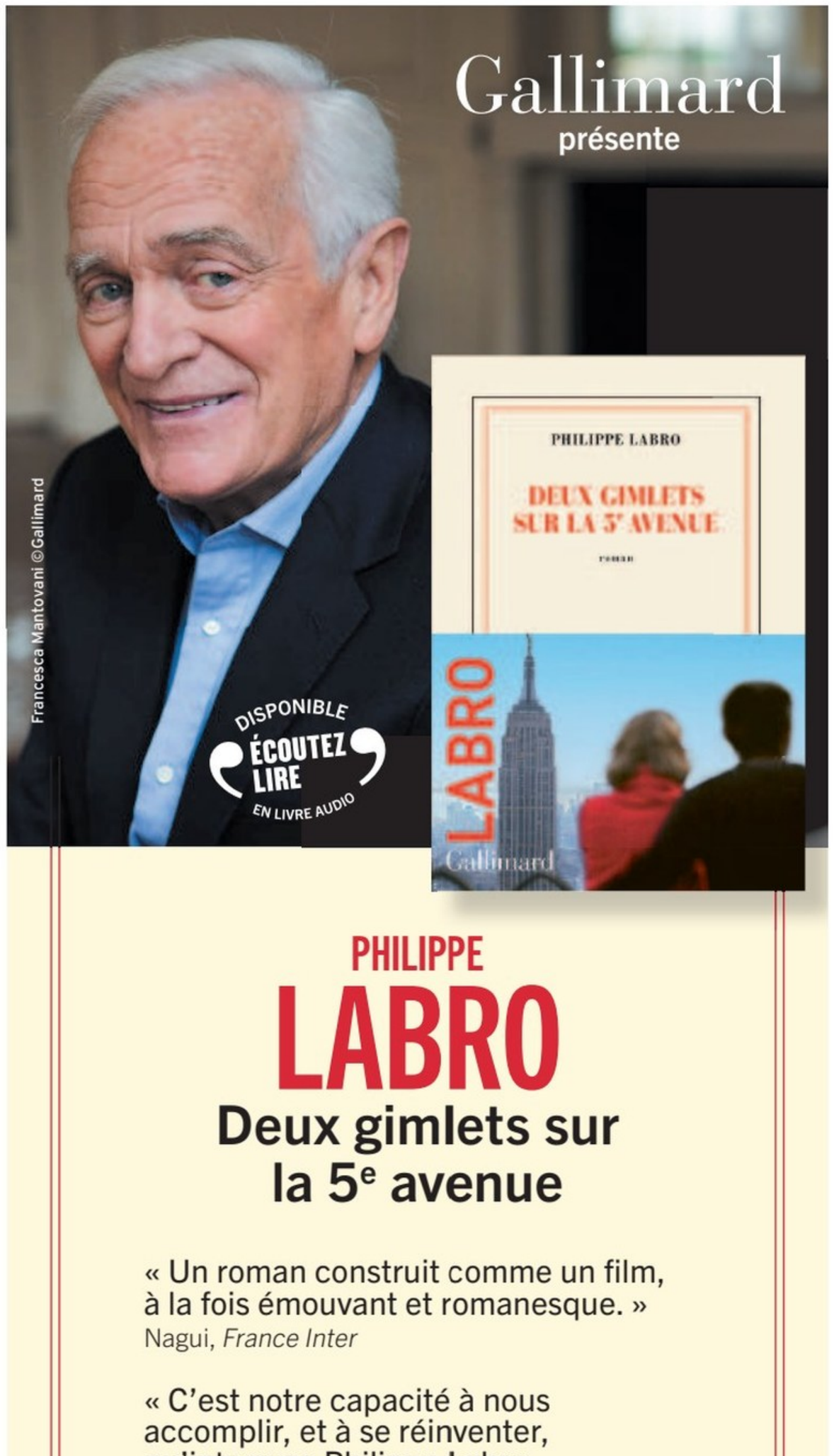
Valérie Verdier, présidente de l'IRD. À l'occasion des 80 ans de l'organisme promouvant la recherche dans les pays en développement, la chercheuse revient sur l'histoire et le futur de l'institut en interview : sciav.fr/933ird *(lire aussi p. 92).*

NICOLAS GAGNON & JOHAN ONG / VELA

Le navire traversera l'Atlantique en moins de 15 jours (vue d'artiste).

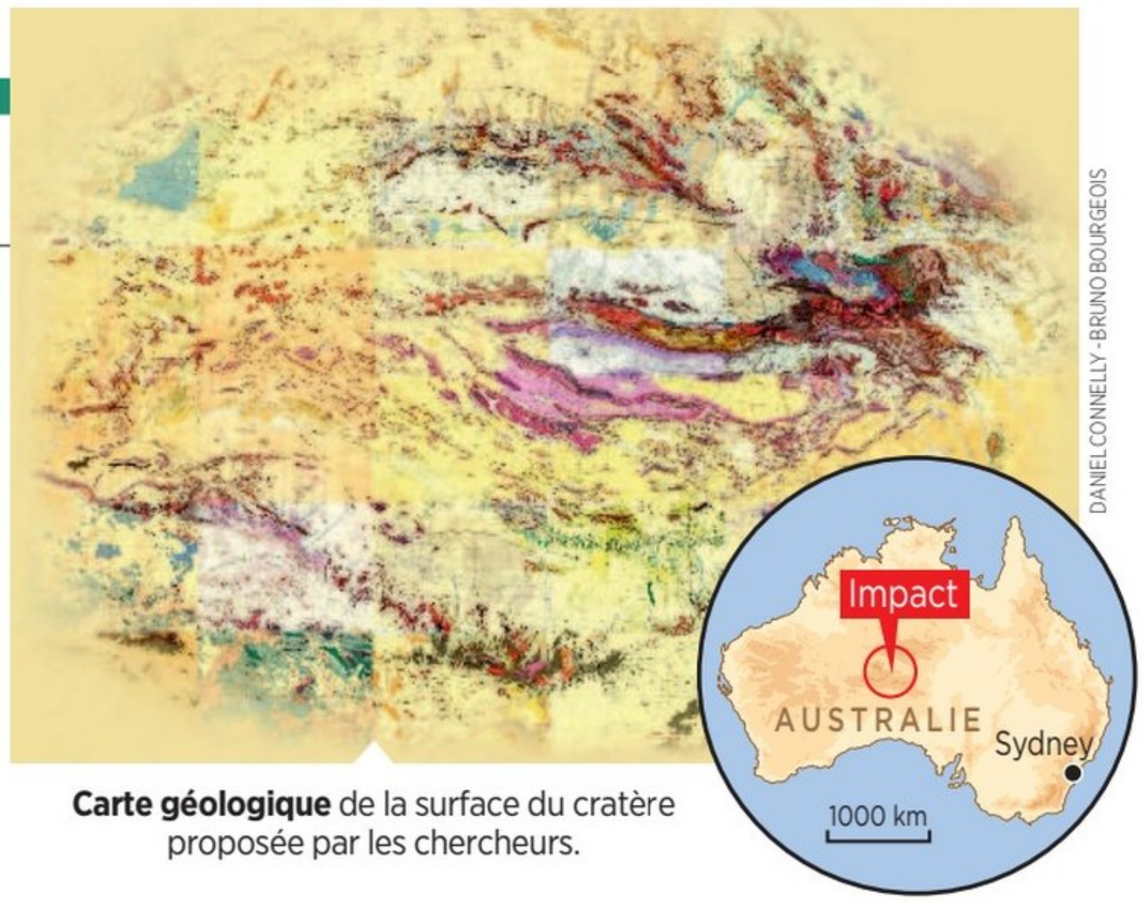
Un trimaran cargo à voiles en construction

TRANSPORTS Après une levée de fonds de 40 millions d'euros, la jeune entreprise française Vela lance la construction en Australie du plus grand trimaran à voiles au monde destiné au transport maritime. En 2026, une première ligne maritime entre la France et les États-Unis permettra des traversées de moins de 15 jours entièrement à la voile. La maîtrise de la température des cales du bateau garantira la sécurité de transport des produits pharmaceutiques, alimentaires, ou de haute technologie. **S. R.**



Un cratère d'impact géant en Australie

Cette vaste structure de 520 kilomètres de diamètre marquerait la chute d'un astéroïde il y a plus de 500 millions d'années.



DANIEL CONNELLY - BRUNO BOURGEOIS

Carte géologique de la surface du cratère proposée par les chercheurs.

Une structure d'impact de 520 km de diamètre décelée au centre de l'Australie pourrait ravir au cratère de Vredefort (300 km), en Afrique du Sud, son titre de plus grand cratère au monde. Deux géologues américains ont rendu publics de nouveaux indices géologiques de son existence. Ils ont découvert près du centre du cratère des dépôts massifs de pseudotachylite, une roche vitreuse formée de roches partiellement fondues par le choc et l'élévation de température d'un impact. D'autres minéraux, telle la lonsdaléite (une forme cristallisée du carbone), témoignent des conditions extrêmes qui ont pu régner au centre du cratère. Enfin, les sédiments entourant son cœur comprennent des couches abondantes d'iridium, rare sur Terre mais courant dans les astéroïdes. L'impact géant se serait produit il y a environ 545 millions d'années, période qui a connu une grande extinction et la disparition de la faune édiacarienne, qui comprenait les premières formes de vie complexes terrestres. **S. R.**

À VOIR SUR LE NET

MAPBOX, OPENSTREETMAP

La future répartition des espèces d'arbres en Europe

DENDROLOGIE Deux experts en visualisation de données ont mis au point un outil saisissant, Nos Forêts demain, à partir de l'étude EU-Trees4F. Celle-ci prédit la répartition de 67 espèces d'arbres en Europe à l'horizon 2035, 2065 et 2095 en s'appuyant sur une gamme de paramètres bioclimatiques et avec deux scénarios climatiques différents. De quoi mieux savoir quels arbres planter pour le siècle à venir, et où. **H. J.**

Pour voir la vidéo, scannez ce QR code

E. SAMPAIO AND S. GINGINS

Dans la partie, le poulpe semble être le chef de bande.

Pieuvre et poissons coopèrent pour chasser

ÉTHOLOGIE D'un tempérament solitaire, la pieuvre peut coopérer pour chasser plus efficacement. C'est ce que montre une étude menée sur 120 heures de séquences filmées en mer Rouge. On y voit une grande pieuvre bleue associée à différentes espèces de poissons qui semblent jouer chacun un rôle spécifique, notamment en lui indiquant où trouver des proies. **S. R.**

SOURCE : EDUARDO SAMPAIO, UNIVERSITÉ DE CONSTANCE, ALLEMAGNE.

Les abeilles ont un microbiote antidiabète

ENTOMOLOGIE **Si les abeilles se gorgeant à longueur de journée d'une boisson très sucrée, le nectar, ne deviennent pas diabétiques, c'est grâce à leur microbiote intestinal, révèle une étude. Cinq espèces bactériennes en particulier ont été identifiées comme participant à la digestion du pollen et du nectar. Elles sont essentielles à la production de l'insuline régulant leur taux de sucre. P. K.**

SOURCE : BENFENG HAN, UNIVERSITÉ AGRICOLE DE PÉKIN, CHINE.

Un bonnet de laine décrypte le cerveau des chats

ZOOLOGIE Pour faire passer un examen d'électro-encéphalographie (EEG) à des chats sans avoir à les endormir et sans que les animaux ne s'acharnent sur les fils, une équipe de vétérinaires et neuroscientifiques a eu l'idée de tisser les électrodes à poser sur le crâne dans un bonnet tricoté en laine. L'EEG peut en effet s'avérer nécessaire au dépistage des douleurs chroniques dont souffrent les chats atteints d'arthrose. Mais la sédation jusqu'ici inévitable peut altérer la perception de la souffrance et donc biaiser les résultats. **A.-S. T.**

ALIÉNOR DELSART

SOURCE : ALIÉNOR DELSART, UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL, CANADA.

Impulscience®

Le goût de l'effort et des objectifs mondiaux.

Les champions de la recherche française dans les sciences de la vie méritent aussi qu'on les soutienne pour améliorer la santé humaine.

Fondation Bettencourt Schueller

Reconnue d'utilité publique depuis 1987

Parce qu'il est un chercheur d'exception en sciences de la vie, **Antoine Jégou** et son équipe bénéficient pendant 5 ans du soutien d'envergure du programme Impulscience.
Pour en savoir plus : **fondationbs.org**

Agence INSIGN - Photographie : © Rémi Issaly

GETTY IMAGES

La pollution lumineuse aurait des effets négatifs sur la santé.

Les lumières nocturnes, possible facteur de risque d'Alzheimer

NEUROLOGIE En comparant l'intensité lumineuse nocturne moyenne répertoriée dans 48 États américains entre 2012 et 2018 et la prévalence de la maladie d'Alzheimer, une équipe américaine suggère que la pollution lumineuse pourrait être un facteur de risque pour cette pathologie neurodégénérative. Les auteurs notent que cette corrélation était plus forte que pour d'autres facteurs de risque comme l'alcool, l'obésité, la dépression ou l'insuffisance cardiaque. **H. J.**

SOURCE : ROBIN VOIGT, UNIVERSITÉ RUSH, ÉTATS-UNIS.

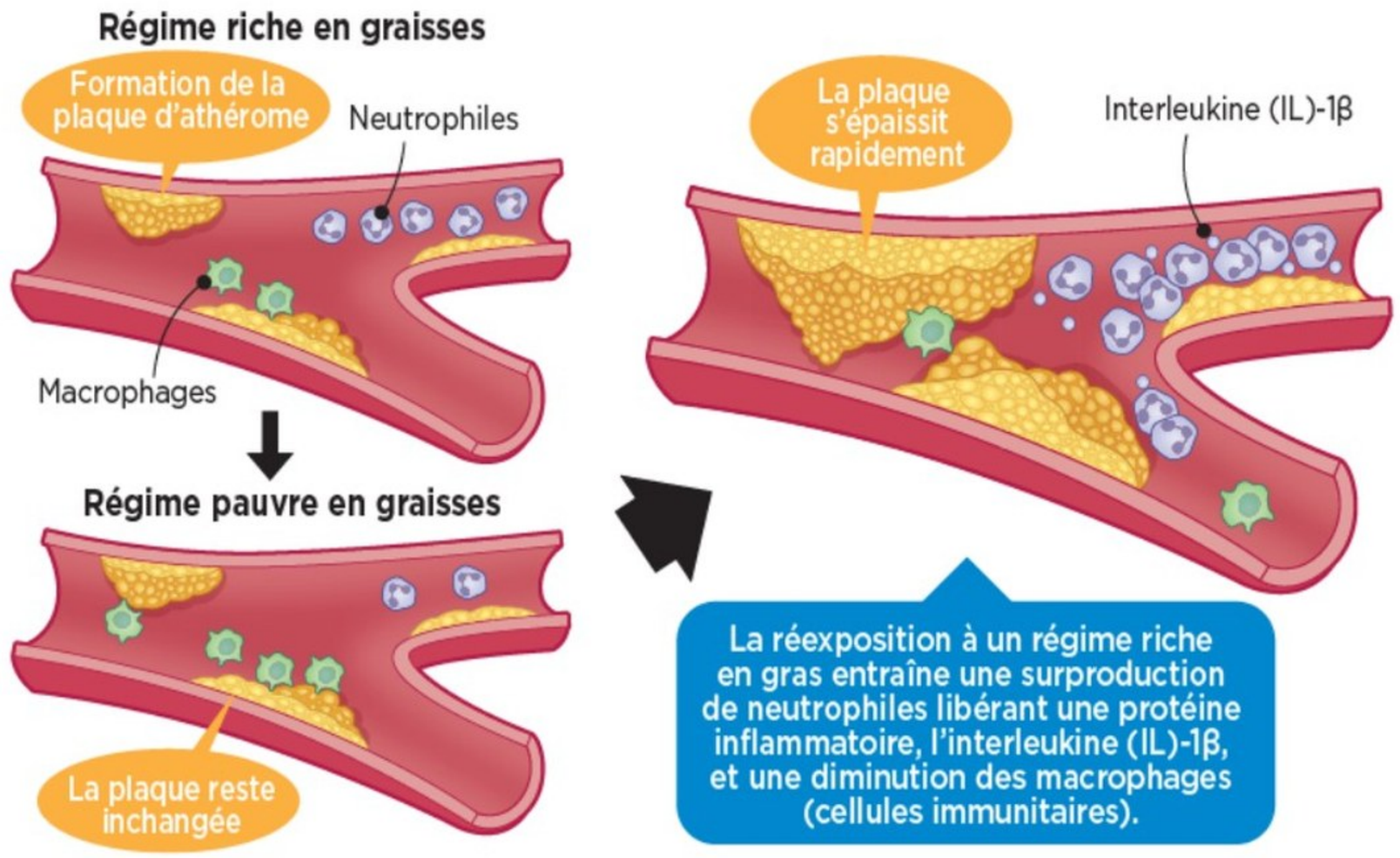
39 MILLIONS

Le nombre de décès par antibiorésistance d'ici à 2050

INFECTIOLOGIE Dans le monde, plus d'un million de personnes par an ont succombé à une infection résistante aux antibiotiques entre 1990 et 2021, estime une étude internationale parue dans *The Lancet*. Selon une modélisation des chercheurs fondée sur 22 agents pathogènes et les données de 520 millions de personnes dans le monde, plus de 39 millions pourraient survenir ces 25 prochaines années. **C. L.**

L'effet yo-yo accentue le risque cardiaque

L'alternance entre des régimes riche et pauvre en graisses augmente l'athérosclérose par rapport à un régime riche en gras continu.

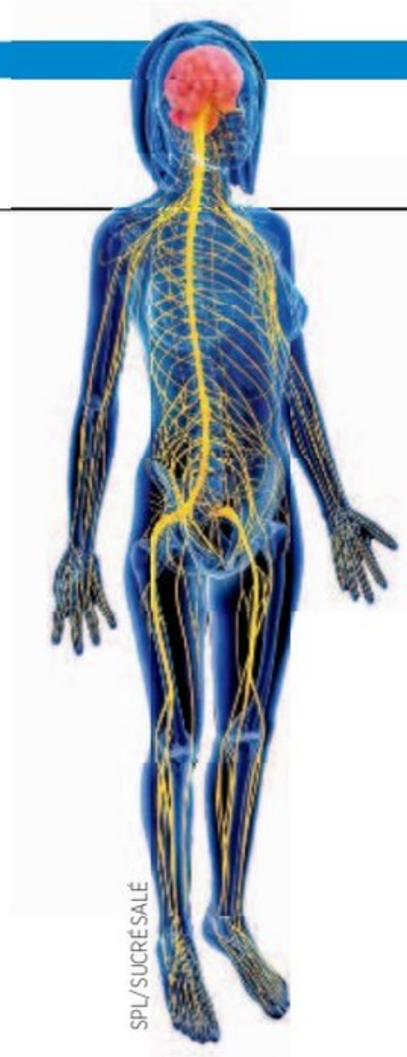


BRUNO BOURGEOIS ; SOURCE : D.J. RADERET AL.

Plus important encore que de perdre du poids, il faut particulièrement veiller à ne pas en reprendre après un régime. C'est en substance ce qu'on peut retenir de deux études publiées ensemble dans *Nature*, qui ont observé la répercussion sur le système immunitaire d'un effet « yo-yo ». Les expériences menées sur des souris modèles par les deux équipes montrent que l'alternance entre des régimes riche et pauvre en graisses « *augmente considérablement l'athérosclérose par rapport à un régime riche en gras continu* », selon Kate Townsend Creasy, professeure en sciences de la nutrition à l'université de Pennsylvanie (États-Unis), coauteure de l'une des études. Pour rappel, l'athérosclérose est une affection inflammatoire chronique dans laquelle le cholestérol et des cellules immunitaires s'accumulent dans les parois des artères, entraînant la formation de plaques d'athérome pouvant obstruer la circulation sanguine, voire provoquer un infarctus ou un AVC (*lire p. 66*) lorsque ces plaques se détachent et bouchent un vaisseau sanguin.

Dans les deux études, aux protocoles pourtant différents, les chercheurs ont constaté une accélération importante de la formation de ces plaques lorsque les souris reprenaient un régime riche en graisses après une diète. En cause ? Des déséquilibres dans l'activité du système immunitaire provoqués par les changements d'alimentation des rongeurs. La réexposition à un régime riche en gras entraîne la production d'une protéine inflammatoire et la baisse du nombre de macrophages (*voir l'infographie*). Deux processus qui expliquent la croissance soudaine des plaques d'athérome. « *À quelques exceptions près, la plupart des données issues de l'athérosclérose chez la souris sont valables chez l'humain* », prévient Kate Townsend Creasy. ■

H. J.


SPL/SUCRÉ SALÉ

La circulation du liquide est continue de la moelle épinière au système nerveux périphérique.

Le liquide du cerveau s'écoule le long des nerfs

ANATOMIE Notre cerveau sécrète un liquide interne qui lui sert de suspension hydraulique et de milieu pour nourrir ses cellules et évacuer leurs déchets.
En injectant des nanoparticules d'or dans le cerveau de souris, des anatomistes ont montré qu'elles pouvaient migrer jusqu'au bout du nerf sciatique dans une gaine close qui l'entoure, ce qui témoigne d'une continuité jusque-là inconnue du liquide cérébro-spinal jusqu'aux nerfs périphériques. **P. K.**

SOURCE: A. LIGOCKI, UNIVERSITÉ DE FLORIDE, ÉTATS-UNIS.

ELLE A DIT

« Ruminer, c'est comme lancer un hamster dans une roue, ça tourne de plus en plus vite, sans pouvoir s'arrêter »

Marine Starostka, psychologue clinicienne et responsable du Fil santé jeunes, commentant une étude de l'Inserm appelant à mieux repérer les ruminations mentales, des pensées invasives en lien avec l'apparition de troubles psychiatriques chez les jeunes adultes.

GETTY IMAGES

L'activité physique de 75 000 personnes a été suivie sur dix ans.

Le sport du week-end a un effet protecteur

ÉPIDÉMIOLOGIE Le risque de dépression, de maladies neurodégénératives ou d'AVC chute en pratiquant une activité physique modérée à intense d'au moins deux heures et demie par semaine, et cela même si elle est concentrée sur le week-end. C'est ce que montre une étude épidémiologique ayant suivi sur dix ans la santé de 75 000 personnes dont le degré d'activité physique était renseigné avec précision grâce à un accéléromètre au poignet. **P. K.**

SOURCE: JIAHAO MIN, UNIVERSITÉ NORMALE DE HANGZHOU, CHINE.

Voici la première prothèse magnétique

Au lieu d'électrodes invasives, ce membre bionique fonctionne grâce à six minuscules aimants implantés sur les muscles résiduels du bras.

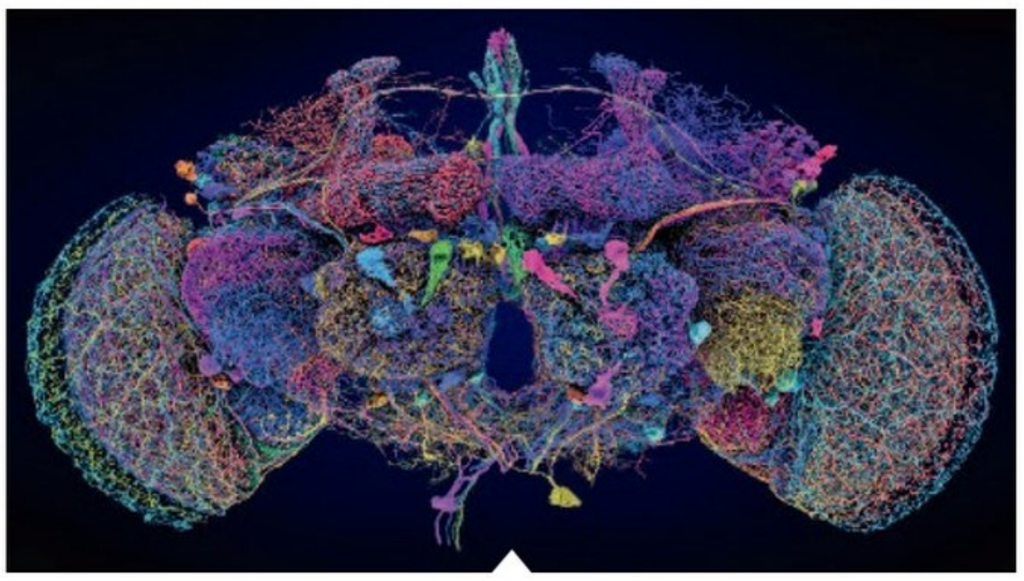
Il peut utiliser un tournevis, couper ses aliments au couteau, remonter une fermeture Éclair et même faire ses lacets… Un Italien de 34 ans amputé de la main gauche en 2022 a retrouvé l'habileté nécessaire à nombre de gestes du quotidien grâce à la première prothèse magnétique mise au point par l'institut BioRobotics de Pise (Italie). Au lieu d'électrodes invasives, ce membre bionique fonctionne grâce à six aimants de quelques millimètres de large implantés sur les muscles résiduels du bras. *« Ce système m'a permis de récupérer des sensations et des émotions perdues : j'ai l'impression de bouger ma propre main »*, a raconté Daniel. Lorsque les muscles se contractent, les aimants bougent sous la peau, ce qui permet de contrôler le membre en fibre de carbone. De l'autre côté, des capteurs intégrés à la prothèse reconnaissent le champ magnétique produit par les aimants. Grâce à ces données, la prothèse enregistre la contraction des muscles du moignon, comprend les intentions de l'utilisateur et permet à la main artificielle de se mouvoir de façon naturelle et intuitive. **C. L.**

SCUOLA SUPERIORE SANT'ANNA

Ce patient amputé de la main gauche a réussi à verser de l'eau dans un verre.

EN DEUX MOTS

MICROBIOLOGIE Des relevés à 3000 m d'altitude au Japon révèlent que de grandes quantités de microbes circulent dans le ciel sur des milliers de kilomètres. **MORTALITÉ** Les maladies respiratoires sont devenues la 3e cause de décès en France, après les cancers et les causes cardio-vasculaires, selon Santé publique France. **DÉPRESSION** La molécule psychédélique des champignons hallucinogènes a été donnée pour la première fois en France à des patients souffrant de dépression dans le cadre d'un essai clinique de phase 3.



PRINCETON UNIVERSITY / AFP

139 255 neurones et 54,5 millions de synapses ont été reconstitués.

Cartographie complète des neurones de la drosophile

NEUROSCIENCES Une équipe internationale est parvenue à dresser la carte de l'ensemble des neurones et connexions du cerveau de la drosophile, cette petite mouche qui vole autour des fruits dans les cuisines. En tout, 139 255 neurones et 54,5 millions de synapses ont été cartographiés. Cette étape majeure pour les neurosciences a donné lieu à une dizaine d'articles dans la revue *Nature*. Le connectome du cerveau humain et ses plus de 80 milliards de neurones restent encore hors de portée. **H. J.**

Une technique pour rendre la peau transparente

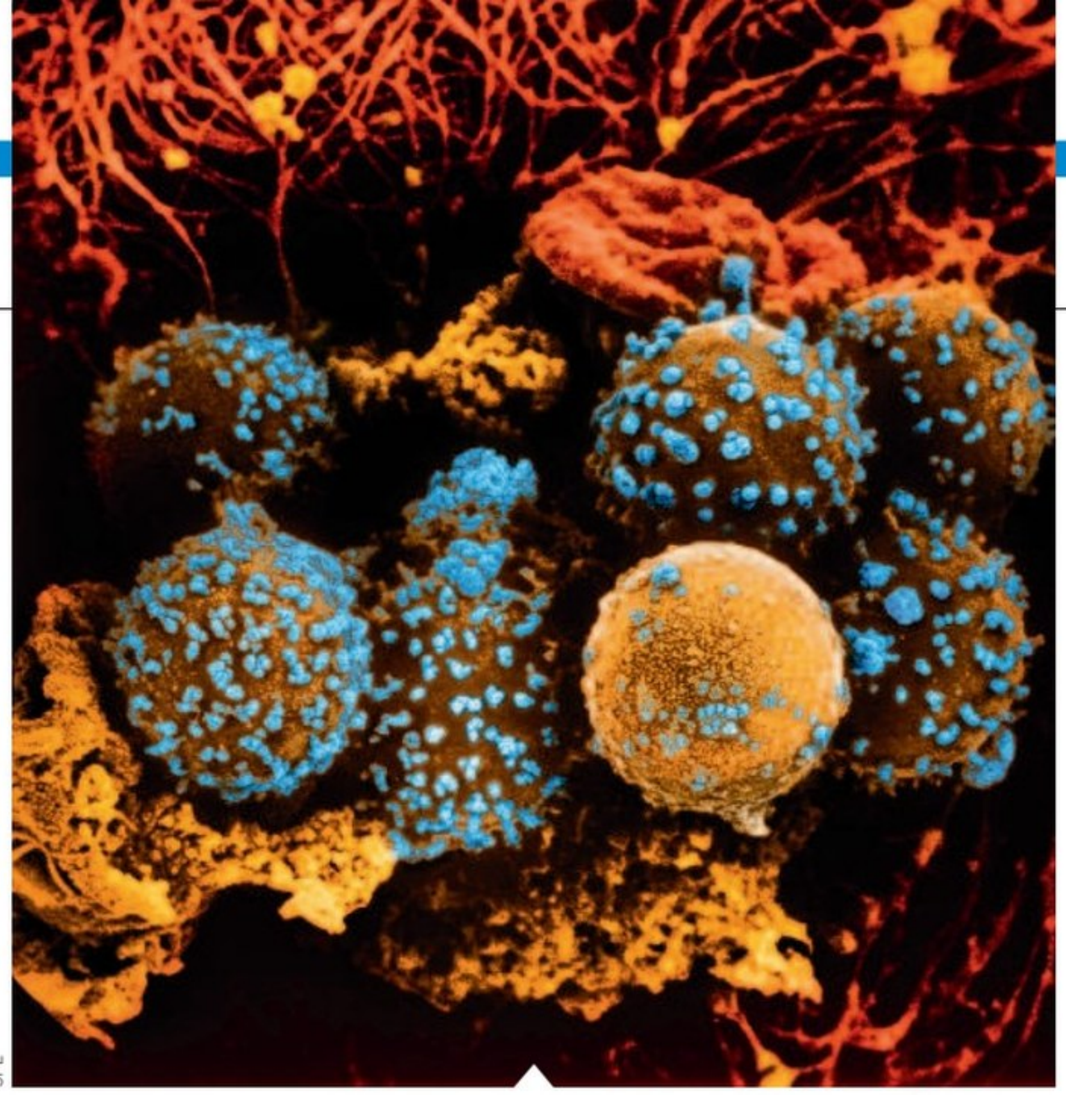
BIOLOGIE Pour la première fois, une équipe a réussi à voir à travers la peau de rongeurs sans les euthanasier. Ils ont appliqué sur la peau un colorant alimentaire jaune courant, la tartrazine, permettant de rendre temporairement les tissus transparents. Le processus pourrait servir à mettre en évidence les veines, faciliter la localisation de blessures, surveiller des troubles digestifs voire identifier des cancers. **H. J.**

SOURCE : ZIHAO OU, UNIVERSITÉ STANFORD, ÉTATS-UNIS.

Un nouveau médicament contre la schizophrénie

PSYCHIATRIE Un nouveau type d'antipsychotique contre la schizophrénie a été autorisé par la FDA, l'agence de régulation des médicaments américaine, pour la première fois depuis plus de 50 ans. Au lieu de cibler les récepteurs dopaminergiques comme les autres traitements, le Cobenfy, commercialisé par Bristol Myers, s'attache aux récepteurs cholinergiques. Si l'efficacité contre les symptômes de la maladie est semblable, il présenterait moins d'effets secondaires, notamment la prise de poids. **H. J.**

BRISTOL MYERS SQUIBB



SPL

Cellules du pancréas sécrétant l'insuline (en bleu) vues au microscope.

Des cellules souches inversent le diabète

DIABÉTOLOGIE Première mondiale : une femme de 25 ans souffrant de diabète de type 1 est de nouveau en mesure de produire sa propre insuline et de réguler ainsi son taux de sucre dans le sang. Il y a un an, les médecins lui avaient prélevé ses propres cellules souches pour les reprogrammer de sorte qu'elles sécrètent la précieuse hormone à la place de celles détruites par la maladie. **C. L.**

SOURCE : SHUSEN WANG, UNIVERSITÉ DE NANKAI, CHINE.

DANIELA COSSIO

Imagerie des fibres neuronales dans la matière blanche.

La grossesse modifie le cerveau de la mère

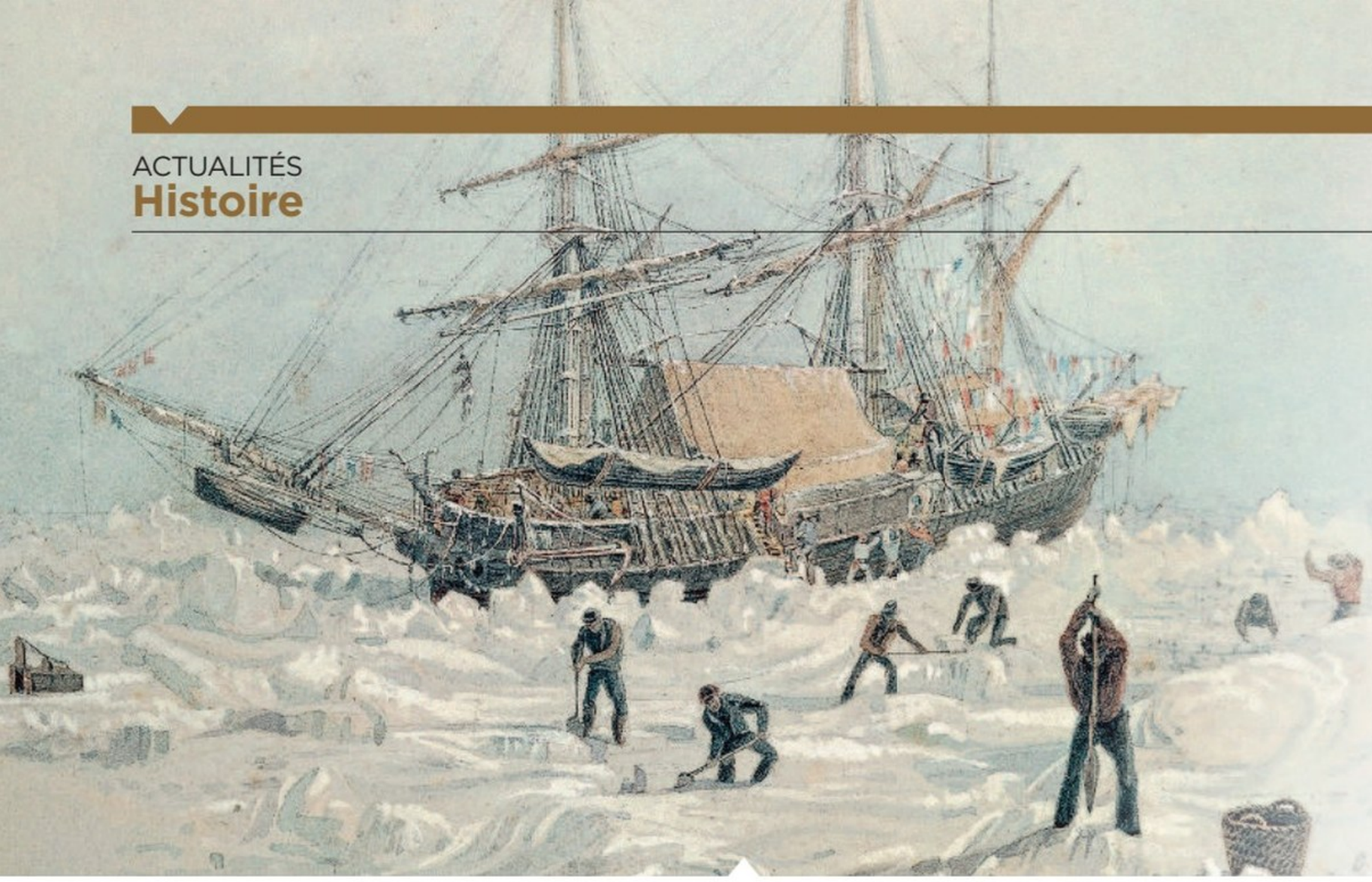
NEUROLOGIE Elizabeth Chrastil, neuroscientifique de 38 ans, a passé en tout 26 imageries cérébrales durant sa grossesse pour étudier au plus près les changements qui s'opèrent dans le cerveau. L'étude a montré une réduction progressive de la matière grise. À l'inverse, un pic temporaire de connectivité neuronale était visible dans la matière blanche à la fin du deuxième trimestre. Si les chercheuses n'ont pu en tirer de conclusions comportementales, leurs travaux lancent une collaboration internationale à poursuivre, le Maternal Brain Project. **C. L.**

SOURCE : LAURA PRITSCHET, UNIVERSITÉ DE CALIFORNIE, ÉTATS-UNIS.

70 500 Le nombre de virus découverts par l'IA

VIROLOGIE La plupart de ces virus à ARN mis au jour par une équipe chinoise habitent dans des environnements extrêmes comme des lacs salés ou des sources hydrothermales. Ils ont été identifiés grâce à la métagénomique — méthode consistant à analyser en vrac les génomes présents dans l'environnement. **H. J.**

SOURCE : XIN HOU, UNIVERSITÉ SUN YAT-SEN, CHINE.

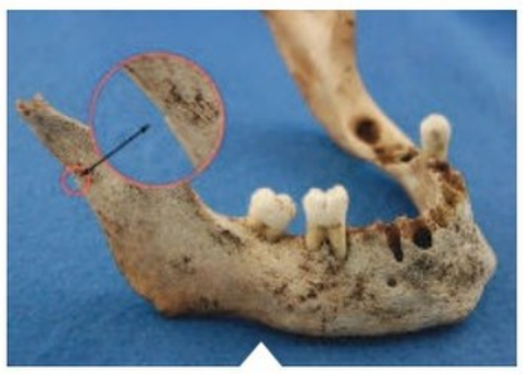


Les membres d'équipage des deux navires britanniques se retrouvèrent prisonniers de la glace au nord-ouest de l'île du Roi-Guillaume, dans l'Arctique canadien, pendant deux ans à compter de septembre 1846.

Le capitaine cannibalisé de l'expédition Franklin

Une étude génétique a permis la première identification certaine des restes d'un des membres de l'expédition, James Fitzjames.

Des 129 hommes embarqués à bord des navires britanniques HMS *Terror* et HMS *Erebus* en mai 1845, aucun n'est jamais revenu. 179 ans plus tard, des restes de l'un des membres de cette expédition partie à la recherche du mythique passage du Nord-Ouest — permettant de rejoindre l'océan Pacifique en naviguant par le cercle polaire arctique — ont pu être identifiés avec certitude. Ils appartiennent au capitaine James Fitzjames, qui secondait le commandant de l'expédition, sir John Franklin. L'identification a été rendue possible grâce à un échantillon d'ADN provenant d'un descendant vivant, qui correspondait à l'ADN ancien découvert sur l'île du Roi-Guillaume au Nunavut (Canada), où 451 os d'au moins 13 marins de Franklin ont été retrouvés depuis les années 1990. L'examen anthropologique des ossements, également conduit par les chercheurs des universités canadiennes de Waterloo et Lakehead, fait du capitaine Fitzjames la première victime attestée du cannibalisme de survie auquel ont dû se livrer les membres de l'expédition. Grâce à un message déposé dans un cairn par le capitaine Fitzjames, les historiens savent que, dès septembre 1846, les navires pourtant équipés de plaques de fer pour renforcer la coque, d'une propulsion mixte à vapeur et à voile et d'un chauffage pour lutter contre le froid à bord, se retrouvent pris dans la glace. Riches de provisions pour trois ans, les équipages restent coincés deux ans. Puis, en avril 1848, les marins — qui ne sont plus que 105 après le décès d'une vingtaine d'hommes, dont John Franklin — abandonnent les navires pour tenter de rejoindre l'embouchure de la rivière Back, plus au sud. Aucun d'eux n'y parviendra, malgré le recours attesté au cannibalisme dans leur détresse finale. Aujourd'hui, les chercheurs appellent d'éventuels descendants à se manifester pour permettre l'identification d'autres ossements de marins. **S. de L.**



Des marques de découpe ont été identifiées sur la mandibule.

AKG IMAGES - ANNE KEENLEYSIDE

Une bague picte millénaire

ARCHÉOLOGIE Venu prêter main-forte à une fouille menée par l'université d'Aberdeen sur le site de l'ancien fort de Burghead, au nord de l'Écosse, un bénévole a découvert une rare bague datée d'environ 1000 ans. L'anneau en forme de cerf-volant est pourvu en son centre d'un grenat ou d'un verre rouge. Il appartient à la culture des Pictes, ces tribus guerrières du nord de l'Écosse connues pour se tatouer le corps et avoir résisté à la domination romaine au Ier siècle. **H. J.**

NATIONAL MUSEUMS SCOTLAND

L'anneau en forme de cerf-volant a été mis au jour en Écosse.

38

Le nombre de tombes médiévales dans une cave

ARCHÉOLOGIE
À Corbeil-Essonnes, un propriétaire a découvert que sa maison avait été construite sur un ancien cimetière. L'an dernier, il était en train de rénover sa cave lorsqu'il est tombé sur un squelette. Le service régional de l'archéologie a alors procédé à une fouille complète et a mis au jour 38 tombes datant du IIIe au Xe siècle. **H. J.**

NOUVEAU

Pour un sommeil réparateur

Mélatonine à **libération prolongée 1,9 mg**

COMPLÉMENT ALIMENTAIRE

Fabriqué en France

Disponible en pharmacie et sur lehning.com

LEHNING
LABORATOIRES

MÉDICATION VÉGÉTALE DEPUIS 1935

2024-PI-112

Pour votre santé, pratiquez une activité physique régulière. www.mangerbouger.fr

Des momies révèlent le secret du kéfir

L'ADN de restes de fromage dévoile que les bactéries à l'origine de la transformation des boissons en kéfir ont évolué pour mieux s'adapter à l'humain.

YUANQUAN/XINHUA/AFP

Le séquençage génétique de trois morceaux de fromage découverts sur des momies vieilles de 3500 ans a permis d'identifier du lait fermenté constitutif de cette boisson ancienne.

La drôle de substance blanche apposée sur certaines momies, âgées de 3500 ans, du cimetière de Xiaohe (au nord-ouest de la Chine) est du fromage kéfir. Et c'est le plus vieux morceau de fromage du monde, même s'il existe des traces de production plus anciennes. Des analyses de l'ADN ont permis d'identifier du lait fermenté de vache et de chèvre. Surtout, les scientifiques y ont trouvé des bactéries et des levures qui sont encore aujourd'hui constitutives des grains de kéfir, ces petits agrégats utilisés pour ensemencer le lait ou les jus de fruits. L'analyse des gènes d'un ferment (*Lactobacillus kefiranofaciens*) indique que celui-ci a évolué au fil des millénaires pour devenir plus efficace et être mieux toléré par les humains. Il en existe deux souches, une originaire du Caucase, qui est la plus utilisée de nos jours, et l'autre du Tibet, plus proche de celle des momies. Cela signifie que la culture du kéfir a dû émerger dans deux foyers indépendants. **J. I.**

À VOIR SUR LE NET

S. WILLNOW/DPA/AFP

Une œuvre inédite de Mozart retrouvée

MUSICOLOGIE La partition d'un trio inédit pour deux violons et basse de Wolfgang Amadeus Mozart (1756-1791) a été retrouvée dans les archives de la bibliothèque municipale de Leipzig (Allemagne). Intégrée au catalogue Köchel répertoriant les œuvres du compositeur sous le titre « Une toute petite musique de nuit », la pièce écrite entre 1765 et 1770 a été donnée à l'opéra de Leipzig. **H. J.**

Pour voir la vidéo, scannez ce QR code

Une allergie au pollen fatale aux mammouths

PALÉONTOLOGIE L'explosion de la densité de pollen après la dernière ère glaciaire pourrait avoir joué un rôle dans le déclin des mammouths laineux en leur provoquant des allergies. Disparue il y a environ 4000 ans, l'espèce aurait notamment souffert d'une perte d'odorat, handicapant les animaux dans leur recherche de nourriture ou de partenaires sexuels pour la reproduction. **H. J.**

SOURCE : GLEB ZILBERSTEIN, SPRINGSTYLE TECH DESIGN LTD, ISRAËL.

La Chouette d'or a été déterrée

CHASSE AU TRÉSOR La plus longue chasse au trésor organisée en France a pris fin jeudi 3 octobre. « Sur la trace de la Chouette d'or » aura captivé quelque 200 000 passionnés depuis son lancement en 1993. Elle reposait sur la publication du livre éponyme dans lequel figuraient 11 énigmes conduisant là où avait été enterrée une contremarque en bronze du trésor : une chouette aux ailes déployées d'environ 50 cm d'envergure et d'un poids de 10 kg en or et en argent, au masque serti de rubis et diamants. Valeur estimée en 1993 : un million de francs (150 000 euros). **H. R.**

S. BRIOLANT/PHOTO12

Pas d'adolescence précoce à la préhistoire

ANTHROPOLOGIE Malgré une espérance de vie plus courte à la préhistoire, le développement des enfants n'était pas plus rapide qu'aujourd'hui, révèle une analyse des restes de 5 filles et 8 garçons de 10 à 19 ans ayant vécu il y a 54 000 à 12 000 ans. À partir de marqueurs comme la minéralisation des canines et la maturation des os du pelvis, les chercheurs ont estimé la puberté conforme aux standards actuels. **N. G. C.**

SOURCE : MARY LEWIS, UNIVERSITÉ DE READING, ROYAUME-UNI.

YAMAGATA UNIVERSITY INSTITUTE OF NASCA / AFP

Parmi les 345 nouveaux géoglyphes mis au jour, 303 sont figuratifs.

Une IA découvre des géoglyphes par centaines

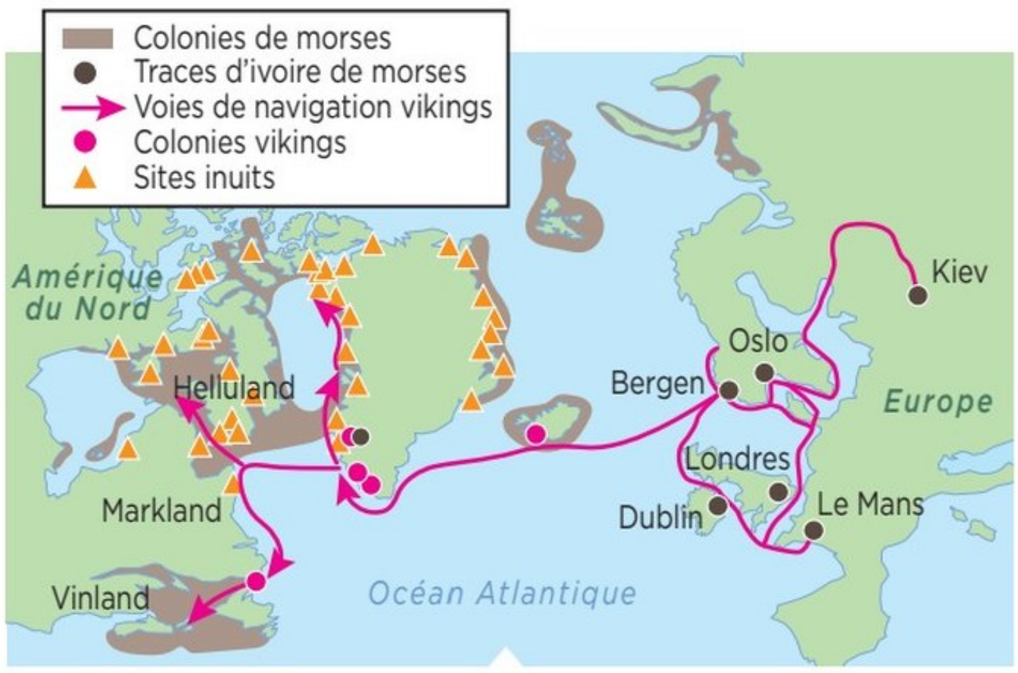
ARCHÉOLOGIE Un programme d'intelligence artificielle mis au point avec IBM a permis la découverte en six mois de 345 nouveaux géoglyphes de Nazca dans la pampa péruvienne. L'algorithme les a repérés sur des images satellite à une vitesse record, puisqu'environ 430 avaient été jusqu'ici identifiés en 80 ans. **S. de L.**

SOURCE : MASATO SAKAI, UNIVERSITÉ DE YAMAGATA, JAPON.

IL A DIT

« Ce dinosaure normand a trouvé un moyen de se déplacer de l'Amérique du Sud jusqu'en Europe, sans doute via *l'Afrique »*

Éric Buffetaut, paléontologue au CNRS, à propos de la découverte des restes d'un *Caletodraco cottardi* au pied des falaises de Saint-Jouin-Bruneval (Normandie). Un dinosaure carnivore dont la trace était inconnue en Europe.



BRUNO BOURGEOIS

Des échanges avaient lieu entre Inuits et Vikings autour de l'ivoire.

Sur les routes de l'ivoire médiéval

GÉNÉTIQUE En examinant l'ADN d'un morse ancien, une équipe internationale a retracé les routes du commerce de l'ivoire de morse à l'ère viking. Ils ont découvert que les Vikings nordiques et les peuples autochtones de l'Arctique se rencontraient et échangeaient probablement de l'ivoire dans des régions reculées du Groenland, plusieurs siècles avant que Christophe Colomb mette les voiles vers les Amériques. **H. J.**

SOURCE : EMILY RUIZ-PUERTA, UNIVERSITÉ DE COPENHAGUE, DANEMARK.

X. MUTH ; AFP ; HIKKADUWALIYANAGE PRASANTHA VINOD/WILDLIFE PHOTOGRAPHER OF THE YEAR ; J. LAHNAKOSKI

L'actualité se poursuit sur Internet

www.sciencesetavenir.fr - www.larecherche.fr

PRÉHISTOIRE

La tribu perdue de Neandertal

Après 9 ans de recherches archéologiques et paléogénomiques, l'analyse d'un fossile de la grotte Mandrin suggère l'existence d'une nouvelle population parmi les néandertaliens récents. Elle serait restée isolée plus de 50 000 ans jusqu'à son extinction. À lire sur le site de *La Recherche* : **https://bit.ly/933ned**

QUESTIONS DE LECTEURS

« Sciences et Avenir » répond à toutes vos interrogations

D'où vient la forme des feuilles d'arbre ? Depuis quand l'humain s'habille-t-il ? Quand les caries sont-elles apparues ? D'où vient le vent ? Retrouvez toutes les réponses aux questions que vous vous posez chaque semaine (*lire aussi p. 96*). **sciav.fr/933quest**

POUR TOUT SAVOIR DE LA SCIENCE

SI VOUS AVEZ...

2 minutes

Première sortie spatiale touristique

SpaceX a réalisé une première historique avec la mission Polaris Dawn, qui a vu des astronautes non professionnels effectuer une sortie dans l'espace. À revoir en vidéo. **sciav.fr/933spacex**

5 minutes

Les plus belles photos nature de 2024

Les gagnants du Wildlife Photographer of the Year 2024, le prestigieux concours de photographie animalière, sont à découvrir en diaporama. **sciav.fr/933wild**

10 minutes

L'imagerie cérébrale de l'amour

Une étude décrit avec précision comment le cerveau est activé par 6 types d'amour différents, pour son conjoint, ses enfants, ses amis ou ses animaux de compagnie... **sciav.fr/933amour**

Vous êtes déjà 2 millions à nous suivre sur Facebook

NOUVEAU VOLVO XC90

HYBRIDE RECHARGEABLE

A 32g CO_2/km
B
C
D
E
F
G

Modèle présenté : Volvo XC90 T8 AWD hybride rechargeable Ultra Chrome avec options et accessoires.
Consommation : 1.3 l/100 km – CO_2 rejeté 32 g/km. Autonomie électrique : 69 km.
Valeurs données selon le cycle mixte WLTP qui peuvent varier selon la conduite et l'environnement.
Plus d'informations sur volvocars.fr
*Google, Google Play, Google Maps et Google Assistant sont des marques déposées par Google LLD.

VOLVOCARS.FR

RCS Nanterre n° 479 807 141.

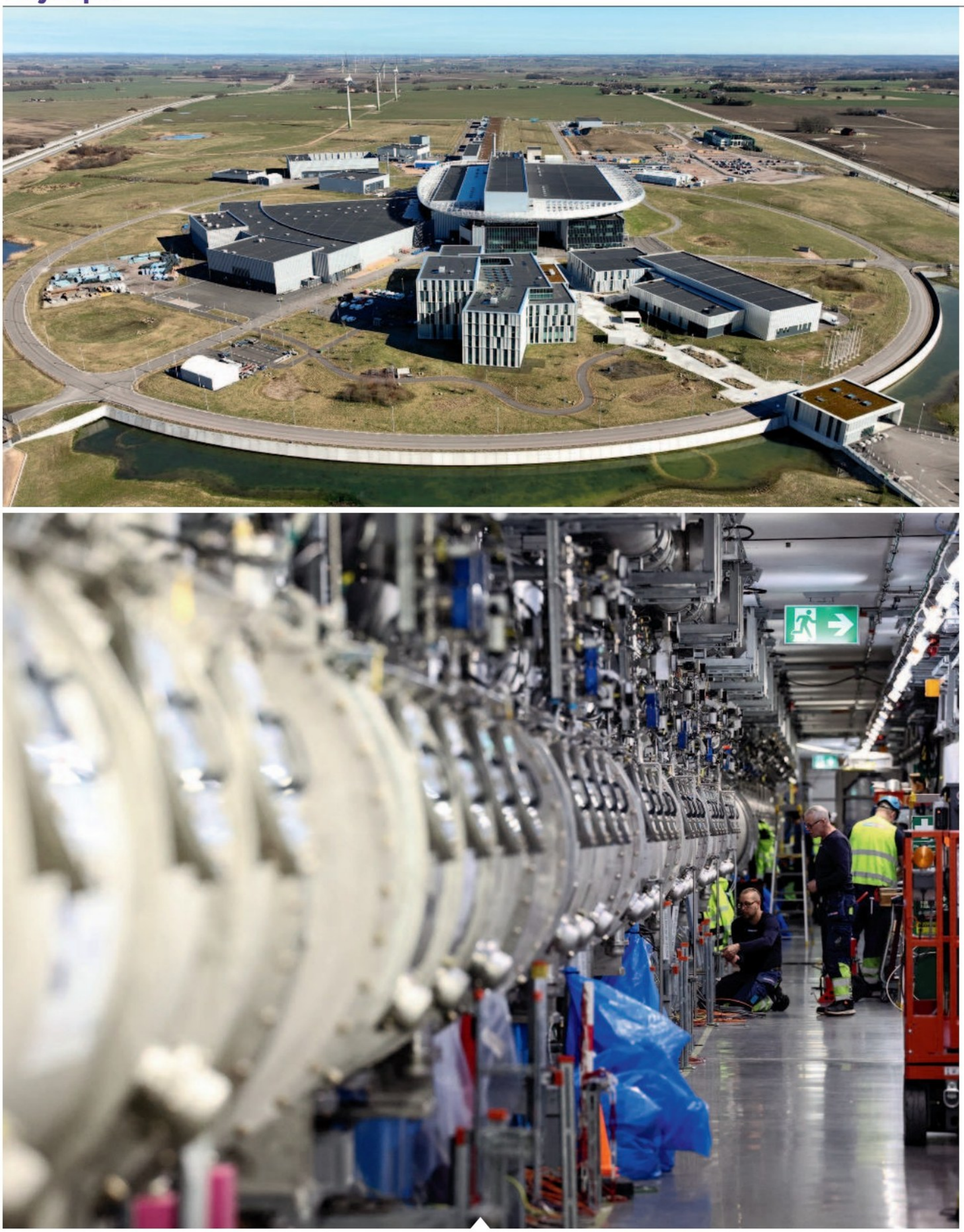
Pensez à covoiturer.

VOLVO

VOTRE VIE ÉVOLUE, NOTRE ICÔNE AUSSI.

Parce que votre vie évolue et vos envies aussi, le nouveau Volvo XC90 hybride rechargeable, 7 places, avec Google intégré* et de multiples espaces de rangement, vous offre la possibilité de voyager où vous voulez, avec qui vous voulez, en toute sécurité. Pour en savoir plus, rendez-vous sur volvocars.com

#SeDéplacerMoinsPolluer



MICHAEL GARTNER/GARTNERFILM - EMMANUEL DUNAND / AFP

Sur 70 hectares, les bâtiments de la future source européenne de neutrons viennent d'être achevés. La pièce maîtresse, l'accélérateur de protons long de 600 mètres (en bas), sera mise en service début 2025. L'ensemble de l'installation suédoise sera opérationnel en 2028 environ.

Neutrons

Un accélérateur va explorer la matière

L'European Spallation Source en construction dans le sud de la Suède deviendra l'une des plus puissantes « usines à neutrons » du monde. La capacité de ces particules à pénétrer la matière sans dommage permettra de mettre au point de nouveaux matériaux et molécules, et bien d'autres applications…

Par Fabrice Nicot

À six kilomètres au nord de la ville universitaire de Lund (Suède), au terminus d'une ligne de tramway prolongée jusqu'à lui, sort lentement de terre un « super-microscope » de 70 hectares, soit une centaine de stades de football. Une fois achevé vers 2028, l'European Spallation Source (ESS) deviendra l'une des plus grandes installations scientifiques en Europe, avec le collisionneur de particules (LHC) du Cern, à Genève (Suisse). Ce nouveau temple de la « Big Science », conçu par un consortium de 13 pays européens, impressionne tant par ses dimensions que par ses objectifs. Il verra les atomes les plus petits, jusqu'à l'hydrogène. Il révélera l'intérieur des objets sans les détruire, bien plus en profondeur que des rayons X. Il observera la matière en mouvement, les molécules qui se lient ou se séparent, les vibrations infimes des matériaux… Tout cela grâce aux neutrons, l'un des constituants du noyau des atomes, dont l'ESS se servira pour jeter sur la matière une « lumière » bien singulière.

Dix ans après le début officiel des travaux, les bâtiments sont achevés au beau milieu de la campagne suédoise. Il faut désormais les investir. Notamment un impressionnant couloir de 600 mètres de long qui abrite l'accélérateur de protons, en cours d'assemblage, d'une puissance de 5 mégawatts à terme. C'est la pièce maîtresse de l'ESS, en grande partie réalisée par des équipes du Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA) de Saclay et du CNRS. De lui dépendra toute la « brillance » de la source de neutrons, ceux-ci étant produits grâce à ces protons ▶

3,6
milliards d'euros
Coût final estimé en 2027.

147
millions d'euros
Contribution française en 2015 (contribution totale de 340 millions d'euros à fin 2027).

de haute énergie. La brillance correspond au nombre de particules émises par centimètre carré et par seconde : 10^{18} dans le cas de l'ESS, avec l'espoir de surpasser ses homologues en activité, le Spallation Neutron Source aux États-Unis, ou le J-Parc japonais. L'accélérateur amènera pour cela les protons à 96 % de la vitesse de la lumière. *« Nous avons dû adapter les technologies éprouvées de nos accélérateurs aux spécificités de l'ESS,* explique Catherine Madec, cheffe de projet accélérateur au CEA. *Il faut obtenir un faisceau de protons stable. Il doit être constitué en paquets, et ne pas se disperser lorsqu'il émerge d'une ligne qui mesure tout de même 600 mètres de long.* » Le faisceau est accéléré et sculpté grâce à un puissant champ électromagnétique généré par des cavités supraconductrices refroidies à -271 °C.

Ces paquets de protons ont ensuite rendez-vous avec la cible en tungstène, autre tour de force de l'ESS. Il s'agit d'une roue de 2,5 mètres de diamètre, pesant 5 tonnes et tournant sur elle-même à 23,3 tours par minute, à peine moins vite qu'un disque vinyle de quelques centaines de grammes. La forme circulaire permet de mieux répartir l'échauffement et l'usure. *« C'est la première cible de cette forme-là,* assure Marie-Hélène Mathon, responsable des infrastructures de recherche en sciences de la matière au CEA. *Sa mise au point a été un véritable défi, notamment pour le système de refroidissement à l'hélium, qui assure la dissipation de l'énergie déposée par le faisceau de protons* [la température de l'hélium oscillera entre 40 °C en pénétrant la cible et 240 °C à sa sortie]. *La trajectoire du faisceau de protons doit être parfaitement contrôlée jusqu'à la cible pour que la création de neutrons soit optimisée derrière.* »

En effet, sous le choc des protons très énergétiques, les atomes de tungstène vont générer des flopées de neutrons grâce au phénomène de spallation *(lire l'encadré ci-contre).*

LLB CNRS - CEA SACLAY

« Cet instrument ouvre des opportunités dans les domaines de la chimie, de la physique, de la biologie ou des géosciences »

Arnaud Desmedt, directeur du laboratoire Léon-Brillouin (CEA/CNRS)

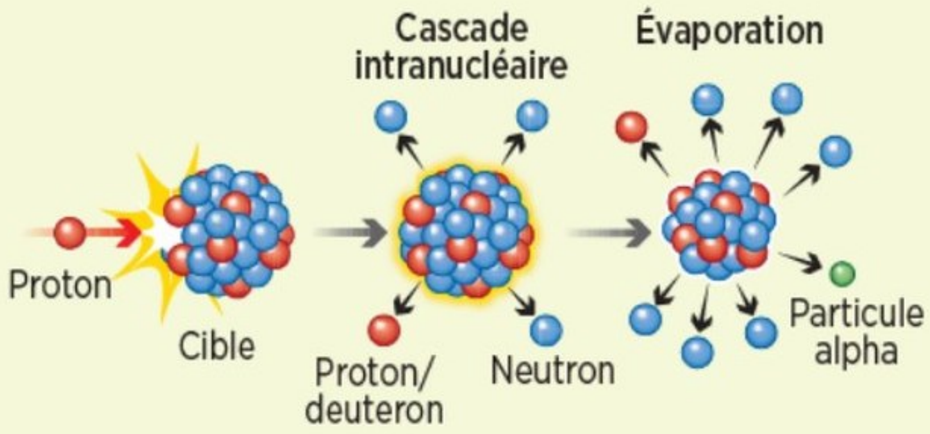
Les neutrons peuvent détecter les plus petits atomes

Les neutrons sont ensuite acheminés vers les salles d'expériences distribuées autour de la cible *(voir l'infographie p. 29)*, une quinzaine au total. Là encore, les guider n'est pas une mince affaire. Le fait qu'ils soient électriquement neutres empêche de les « contrôler » avec un champ électrique ou magnétique. La solution consiste à les traiter comme de la lumière classique, révèle Marie-Hélène Mathon.

PHYSIQUE NUCLÉAIRE

Comment on produit des neutrons

Les principales sources de neutrons utilisées pour la recherche reposent sur deux mécanismes : la fission nucléaire et la spallation. La fission est la plus ancienne méthode, utilisée dès les années 1950. Dans un réacteur nucléaire, un noyau d'uranium 235 capture un neutron et se divise en plusieurs noyaux plus légers, libérant de l'énergie et trois neutrons. Ceux-ci provoquent d'autres fissions, conduisant à une réaction en chaîne contrôlée. La France a compté deux réacteurs de ce type, celui d'Orphée à Saclay (fermé en 2019) et celui de l'institut Laue-Langevin de Grenoble. L'ESS utilisera une technique bien plus efficace, perfectionnée dans les années 2000 : la spallation (de l'anglais *to spall*, produire des éclats). Un accélérateur projette des protons à grande énergie sur une cible de métal lourd (du tungstène à l'ESS). Lorsqu'un proton frappe le gros noyau, il transfère son énergie à celui-ci et l'« excite ». Tout l'édifice nucléaire est comme secoué par le choc, et quelques neutrons s'échappent. C'est la « cascade intranucléaire ». Puis le noyau se désintègre en émettant de nombreux neutrons, quelques protons et noyaux d'hélium. C'est la phase d'« évaporation ». Une vingtaine de neutrons peuvent être produits par chaque atome de tungstène.

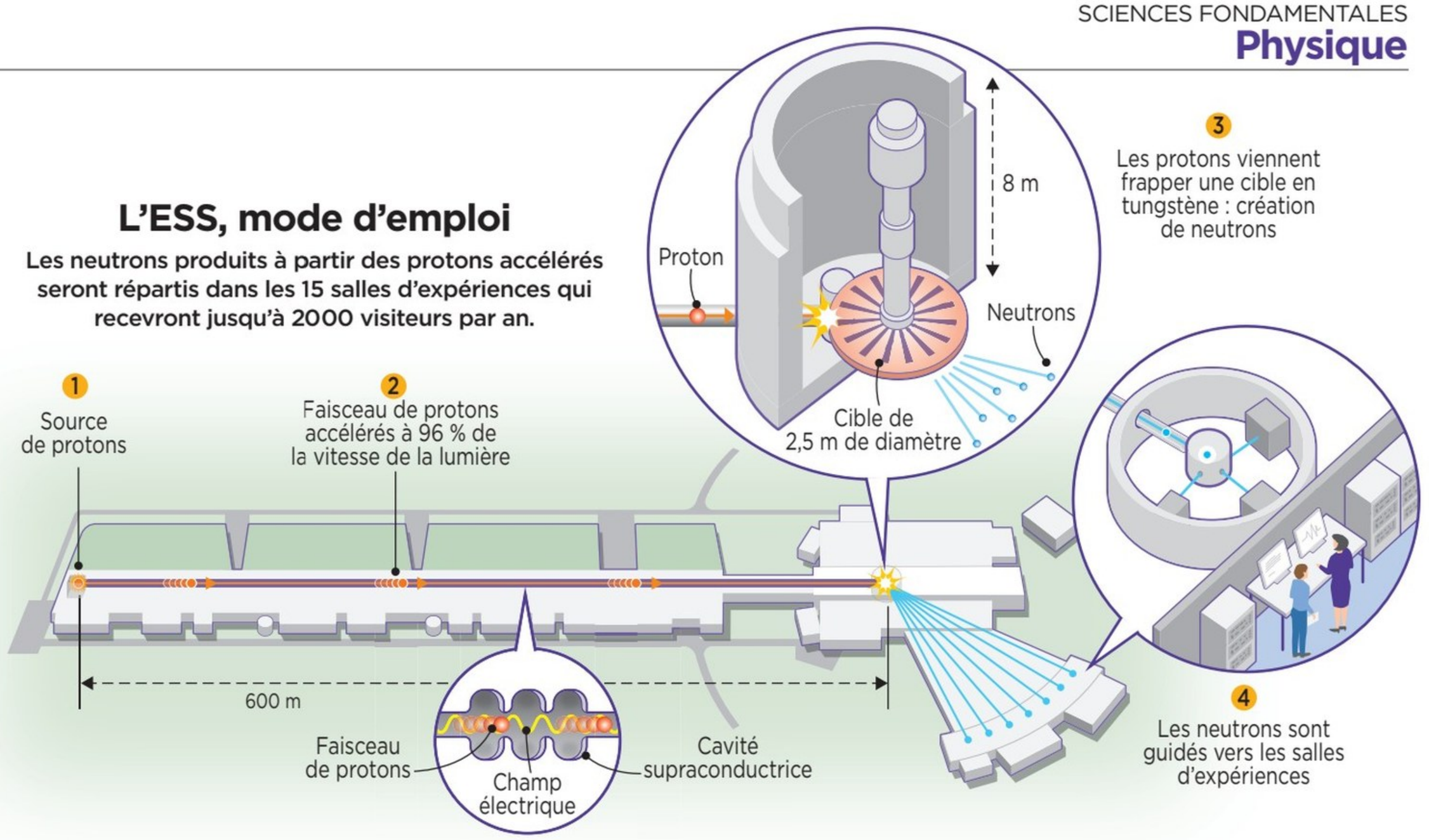


La spallation consiste à produire des neutrons grâce à un choc entre des protons de haute énergie et des atomes lourds.

BRUNO BOURGEOIS

L'ESS, mode d'emploi

Les neutrons produits à partir des protons accélérés seront répartis dans les 15 salles d'expériences qui recevront jusqu'à 2000 visiteurs par an.



BRUNO BOURGEOIS

« Les neutrons circulent dans des guides constitués de "supermiroirs", ce sont des matériaux multicouches optimisés pour réfléchir totalement le faisceau, ce qui permet de les conduire sans trop de perte. »

Déferlant dans les 15 salles d'expériences, les neutrons seront ensuite exploités par divers instruments dont le point commun est de les recueillir après leur rencontre avec l'échantillon à étudier. En effet, le principe de l'analyse ressemble un peu… au billard. Les neutrons sont déviés par les noyaux des atomes de la cible. La déviation révèle l'agencement des atomes. N'est-ce pas ce que font déjà les rayons X ? *« Les rayons X interagissent avec les électrons qui entourent le noyau des atomes,* précise Marie-Hélène Mathon. *Ils sont donc sensibles aux gros noyaux qui ont un cortège électronique étoffé. Les neutrons, sans charge électrique, ne "voient pas" les électrons. Ils n'interagissent qu'avec les noyaux. Ils peuvent ainsi détecter des petits atomes, notamment l'hydrogène et ses isotopes* [noyaux dotés du même nombre de protons, mais d'un nombre de neutrons différents]. » Autre avantage des neutrons : ils permettent l'étude des propriétés magnétiques des matériaux en révélant l'orientation des champs magnétiques qu'ils traversent. Enfin, leur faible interaction avec la matière les rend très pénétrants, bien plus que les rayons X, tout en restant non destructifs, ce qui offre la possibilité d'examiner des échantillons en profondeur.

Répondre à de nombreux défis technologiques actuels

Arnaud Desmedt, directeur du laboratoire Léon-Brillouin (CEA/CNRS) qui contribue à cinq des 15 instruments, fait partie des futurs utilisateurs. Son enthousiasme rappelle celui des astronomes au moment du lancement du télescope spatial James-Webb en 2021. *« J'en ai des frissons,* confie volontiers le chercheur. *Je suis comme un gamin parce que c'est un instrument extraordinaire. Grâce à la brillance de la source, nous allons diminuer au moins par dix le temps d'acquisition des données par rapport aux sources actuelles, et nous aurons la possibilité de travailler sur des échantillons bien plus petits. Cela ouvre des opportunités dans les domaines de la chimie, de la physique, de la biologie ou des géosciences.* » De quoi répondre aux grands défis actuels autour des nouvelles technologies quantiques, de la santé, de l'environnement, du climat ou encore de la transition énergétique. Prenons un exemple d'actualité : le stockage de l'hydrogène. Les hydrures métalliques, des alliages capables d'ab-

PAUL SHERRER INSTITUTE

L'imagerie avec des neutrons (à droite) est plus sensible aux atomes légers que les rayons X (à gauche), et révèle ainsi les parties en plastique de l'appareil photo.

sorber ou de relâcher les atomes d'hydrogène, ou bien les matériaux poreux ou nanostructurés, font partie des pistes prometteuses. Pour Arnaud Desmedt, l'ESS devrait permettre d'améliorer leurs performances. *« La sensibilité des neutrons aux noyaux légers permet à la fois de masquer le matériau de stockage et de révéler la présence de l'hydrogène. On peut ainsi voir et comprendre comment il s'insère dans les interstices des matériaux, dans l'espoir d'augmenter la capacité de stockage. On pourra aussi adoucir les conditions d'utilisation, avec des pressions plus proches de l'ambiant par exemple* [aujourd'hui, la pression est typiquement de plusieurs centaines de bars dans un réservoir pressurisé]. »

Observer avec une résolution de l'ordre du nanomètre

Cet hydrogène peut ensuite alimenter une pile à combustible, qui convertit l'hydrogène en électricité. Un des éléments clés de la pile est l'électrolyte, un solide ou un liquide qui conduit les protons d'une électrode à l'autre. Plus l'électrolyte est conducteur, meilleures sont les performances de la pile. *« Pour améliorer la conduction des protons (qui sont des noyaux d'hydrogène), il faut connaître leur position et suivre leur progression,* détaille le chercheur. *Grâce aux neutrons, on a accès à leurs déplacements. Progressent-ils par sauts réguliers ? ou bien, au contraire, s'attardent-ils dans différents sites ? Voilà le genre de questions que l'on peut se poser. Les réponses permettront d'élaborer et valider des modèles numériques. Expériences réelles et numériques sont au cœur des recherches et développements futurs. »*

Les sciences du vivant devraient aussi bénéficier de l'apport de l'ESS. D'ailleurs, la médecine n'a pas attendu l'installation suédoise pour utiliser les neutrons, comme en témoigne la crise du Covid. En 2021, une étude menée avec la source de l'Institut Laue-Langevin de Grenoble a ainsi révélé comment la protéine Spike du Sras-CoV-2 provoque un « arrachement » des membranes cellulaires pour pénétrer dans la cellule hôte. Cette découverte a été possible en observant les membranes avec une résolution de l'ordre du nanomètre (10^{-9} m).

L'ESS, avec sa capacité à observer des échantillons à ces échelles, devrait aider à la mise au point de nouveaux médicaments capables de délivrer leur principe actif à un endroit précis du corps. Pour cela, il faut l'encapsuler dans une structure assimilable par l'organisme et qui va se dissoudre progressivement. *« Pour pouvoir développer ces structures macromoléculaires et biocompatibles, on a besoin de savoir quelle structure on a formée : est-elle tubulaire ? planaire ? Avec les neutrons, nous aurons aussi accès à la cinétique de ces structures, et voir par exemple en combien de temps, et de quelle manière, elle se décompose. »*

Pour l'heure, les futurs expérimentateurs prennent leur mal en patience. Une habitude : le projet, qui mobilise le savoir-faire de près de 550 personnes de 55 pays différents, est né officiellement en 2003… Mais l'échéance est enfin visible. La mise en service de l'accélérateur de protons est prévue pour début 2025. Les premiers neutrons jailliront fin 2025-début 2026. Il faudra ensuite au moins un an de réglages avant de pouvoir accueillir les quelque 2000 visiteurs scientifiques attendus chaque année, tout au bout de la petite ligne de tramway… ■

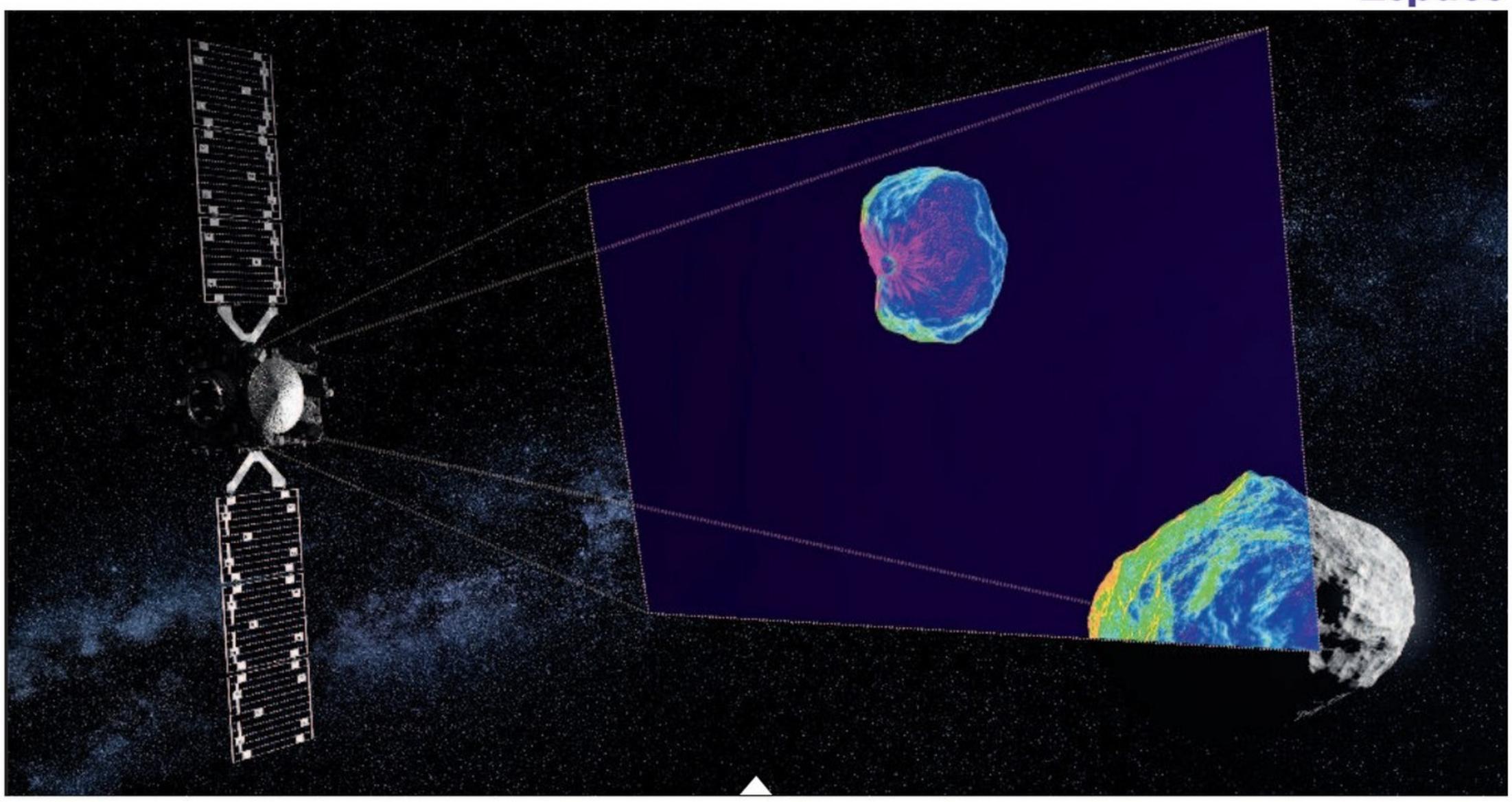
PROJET ICONE

Une source de neutrons à la française

L'unique source de neutrons tricolores — le réacteur Orphée installé à Saclay (Essonne) dans les années 1980 — a été fermée en 2019. Le seul accès national est désormais la source européenne de l'institut Laue-Langevin à Grenoble. Construite en 1971, elle devrait cesser son activité vers 2033. Une angoisse pour la communauté française des neutroniciens (1500 personnes, 300 laboratoires). *« Le temps de faisceau de l'ESS sera compté et seules des manips bien débroussaillées seront acceptées*, alerte Marie-Hélène Mathon, du CEA. *Il nous faut une source moins brillante mais plus accessible, tant pour la préparation que pour maintenir nos compétences. »* Le CEA et le CNRS se sont associés pour proposer la construction d'une source compacte à Saclay, utilisant un accélérateur de particules de 50 m, baptisé Icone. Le projet attend maintenant un feu vert financier pour voir le jour.

NICOLAS KRIEF / CEA

La contribution française porte notamment sur la construction des cryomodules de l'accélérateur (ici des chercheurs du CEA). ►



ESA

L'imageur thermique infrarouge de l'orbiteur Hera fournira des données précieuses sur les propriétés physiques à la surface de Dimorphos (au centre), frappée par la sonde Dart de la Nasa en septembre 2022.

Déviation d'astéroïde : l'enquête se poursuit

La mission européenne Hera va étudier le comportement de l'astéroïde Dimorphos après le crash de la sonde Dart en 2022 visant à modifier sa trajectoire. Une expérience inédite de défense planétaire.

Si l'on découvre un jour qu'un astéroïde se dirige tout droit vers notre planète, serons-nous capables de modifier sa trajectoire et éviter ainsi une collision cataclysmique ? En septembre 2022, la sonde Dart de la Nasa réalisait le premier test de déviation d'astéroïde de l'histoire en percutant intentionnellement Dimorphos, rocher céleste de 150 mètres de diamètre passant alors à 11 millions de kilomètres de la Terre (*lire* S. et A. *n° 908*). Le deuxième acte de cette expérience inouïe vient tout juste de débuter. Le 7 octobre, l'orbiteur Hera, conçu cette fois par l'Agence spatiale européenne, est parti en effet de cap Canaveral en Floride (États-Unis) pour rejoindre Dimorphos fin 2026 et inspecter au plus près la « scène de crime ». Il examinera en particulier la surface de l'astéroïde, sa topographie, le cratère créé par l'impact et même sa structure interne. *« Cette enquête approfondie est absolument indispensable pour comprendre comment Dimorphos a réagi et été dévié par le choc,* souligne Patrick Michel, spécialiste des petits corps à l'observatoire de la Côte-d'Azur et responsable scientifique d'Hera. *Elle permettra de valider et calibrer les simulations numériques d'impact afin de les adapter à différents scénarios, d'autres astéroïdes qui nous menaceraient véritablement.* »

Plusieurs raisons avaient fait de Dimorphos une cible de choix. Sa taille tout d'abord, aussi grande que la pyramide de

Gizeh (Égypte), qui correspond au seuil à partir duquel la chute d'un astéroïde libère une énergie supérieure à 10 millions de bombes d'Hiroshima. De quoi raser instantanément un pays comme la Belgique ! Et affecter des zones habitées quelle que soit la région du globe où le bolide s'écrase, même au milieu de l'océan, en engendrant des mégatsunamis et de gigantesques séismes. Ce type d'objets célestes — ils seraient environ 25 000 à croiser l'orbite de la Terre — percuterait notre planète tous les 20 000 ans en moyenne. Si « *aucun de ceux que l'on connaît ne semble poser de danger pour au moins les 100 années qui viennent* », rassure Patrick Michel, ces géocroiseurs font l'objet d'une attention particulière du fait de leur nombre et des ravages qu'ils pourraient occasionner. Mais Dimorphos présente une autre caractéristique très intéressante. Il gravite autour d'un astéroïde plus imposant de 780 mètres de diamètre, Didymos, à 1,2 kilomètre de distance. Et se comporte ainsi comme une petite lune qui, avant l'impact avec la sonde américaine, mettait exactement 11 heures et 55 minutes à effectuer une révolution complète autour de son corps parent. En mesurant la modification de la période orbitale causée par la collision avec Dart, « *nous pouvions tester ainsi, en conditions réelles et sans aucun risque pour la Terre, cette technique de déviation d'astéroïde* », expose Patrick Michel.
Les résultats ont dépassé les projections les plus optimistes. Alors que la Nasa avait pour objectif de réduire d'au moins 73 secondes l'orbite de Dimorphos, celle-ci a été diminuée de 33 minutes après le crash, ont attesté divers observatoires basés aux États-Unis, au Chili ou en Afrique du Sud. Les télescopes spatiaux Hubble et James-Webb ont visualisé par ailleurs d'immenses quantités de débris projetés dans l'espace : des dizaines de rochers mesurant plusieurs mètres de large et une queue de poussières s'étirant sur plus de 10 000 kilomètres — soit une masse totale évaluée à un million de tonnes.

Connaître l'état précis dans lequel se trouve Dimorphos

Même si tout indique que Dart a été un fabuleux succès, « *des questions cruciales restent en suspens* », signale Alain Hérique, chercheur à l'Institut de planétologie et d'astrophysique de Grenoble (Ipag) participant à la mission Hera. Car pour comprendre comment l'orbite de Dimorphos a été modifiée et extrapoler cette expérience à d'autres astéroïdes gravitant autour du Soleil, les scientifiques doivent établir « *un bilan complet en énergie et déterminer pour cela une foule de paramètres* », précise l'astrophysicien. Ils ont besoin de savoir, en particulier, quelle « quantité de mouvement » totale a été transmise à Dimorphos au moment du choc. Cette grandeur dépend de la direction, de la masse (580 kg) et de la vitesse (24 000 km/h) du projectile, mais également de la masse de l'astéroïde : une information capitale pour le moment inconnue.
Ce n'est pas tout. Car les débris projetés par la collision produisent aussi une certaine quantité de mouvement — et ce faisant, une poussée supplémentaire (d'un facteur compris entre 2 et 5, supposent les chercheurs) qui doit être caractérisée. « *Selon le principe d'action-réaction, l'éjection de matière propulse l'astéroïde dans la direction opposée, un peu comme une fusée au décollage* », explique Alain Hérique. C'est là que la situation se complique. Car l'ampleur et les modalités du processus sont liées elles-mêmes à

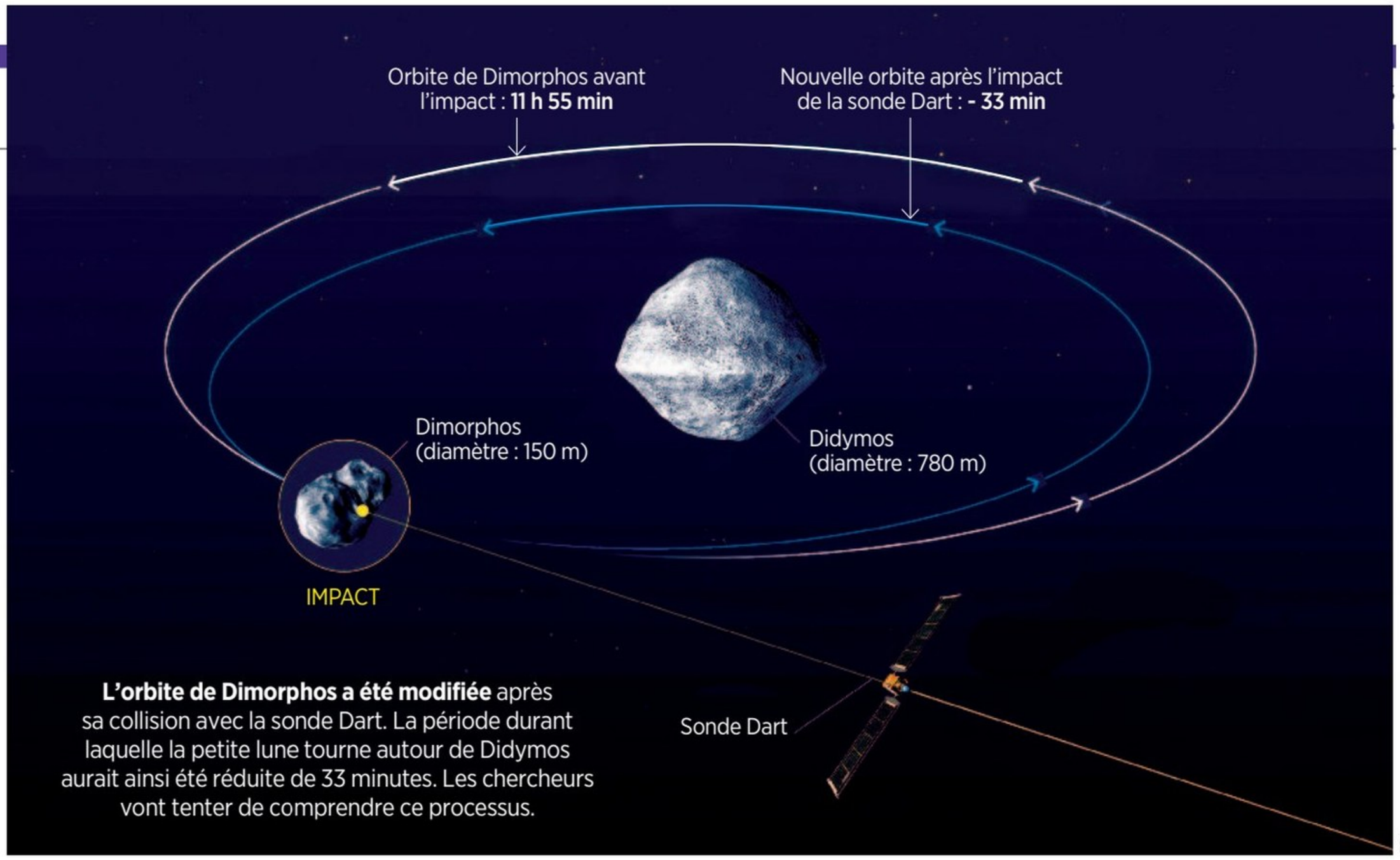
PHÉNOMÈNE

Des étoiles filantes d'origine humaine

Dans sept à dix ans, des grains de poussières issus de la collision entre la sonde Dart et l'astéroïde Dimorphos pourraient atteindre notre planète et produire une pluie d'étoiles filantes, ont annoncé en septembre des chercheurs catalans. Trop petits (autour de 1 cm) pour toucher le sol et causer le moindre dégât, ils se consumeraient entièrement dans la haute atmosphère. Et engendreraient des traînées lumineuses semblables aux Perséides, essaim de météores provenant de la comète Swift-Tuttle visibles au mois d'août dans l'hémisphère Nord. « *Ce serait alors la première pluie d'étoiles filantes engendrée artificiellement par l'homme* », s'ébahit l'astrophysicien Patrick Michel. Un spectacle qui serait aussi observable au mois de mai dans l'hémisphère Sud, précisent les scientifiques espagnols.

S.D. RADUCAN, UNIBE

L'impact de la sonde Dart sur Dimorphos a provoqué une propulsion de matières (simulation numérique).



L'orbite de Dimorphos a été modifiée après sa collision avec la sonde Dart. La période durant laquelle la petite lune tourne autour de Didymos aurait ainsi été réduite de 33 minutes. Les chercheurs vont tenter de comprendre ce processus.

ESA

la composition, à la structuration et à la porosité de l'astéroïde, pour le moment indéterminées, mais aussi à l'apparition d'un cratère, au soulèvement de rebords et plus généralement aux déformations morphologiques susceptibles d'absorber l'énergie de Dart. Autant de phénomènes là encore mystérieux… Sans compter qu'ils se produisent sur un corps peu massif générant une très faible gravité, considérée comme un million de fois moins élevée que sur Terre. « *On connaît encore très mal le comportement de la matière granulaire dans de telles conditions lorsque les forces de cohésion sont si faibles* », relève Alain Hérique. En février, des travaux fondés sur des modélisations et des observations astronomiques récentes de Dimorphos supposaient ainsi que sa surface et sa forme globale auraient été complètement remodelées par la collision avec Dart. Après le passage de l'onde de choc, le cratère d'impact aurait pu être aussi gros que le corps lui-même, le déformant donc entièrement. « *Nous n'avons en fait aucune idée de l'état dans lequel se trouve actuellement Dimorphos,* reconnaît Patrick Michel. *D'où la nécessité, pour répondre à toutes nos questions, de se rendre sur place avec Hera.* »

Le premier radar à sonder l'intérieur d'un astéroïde

Les investigations de la sonde européenne dureront environ six mois. Elles s'appuieront sur un altimètre laser, un imageur infrarouge et diverses caméras qui cartographieront la surface de Dimorphos et examineront les conséquences de l'impact avec une résolution allant jusqu'à 10 cm. Posté à une trentaine de kilomètres de l'astéroïde, Hera émettra également des signaux électromagnétiques permettant de calculer son champ de gravité et par conséquent sa masse. Mais le vaisseau larguera aussi deux minisatellites de la taille d'une boîte à chaussures qui orbiteront à quelques kilomètres de l'astre. L'un d'eux, Milani, doté d'un imageur hyperspectral, analysera sa composition minéralogique. Tandis que l'autre, Juventas, auscultera sa structure interne grâce à un radar développé à l'Ipag de Grenoble. Pesant 1,3 kg, « *c'est le plus petit radar ayant jamais volé dans l'espace mais surtout le premier à sonder l'intérieur d'un astéroïde* », se réjouit Alain Hérique, investigateur principal de l'instrument.

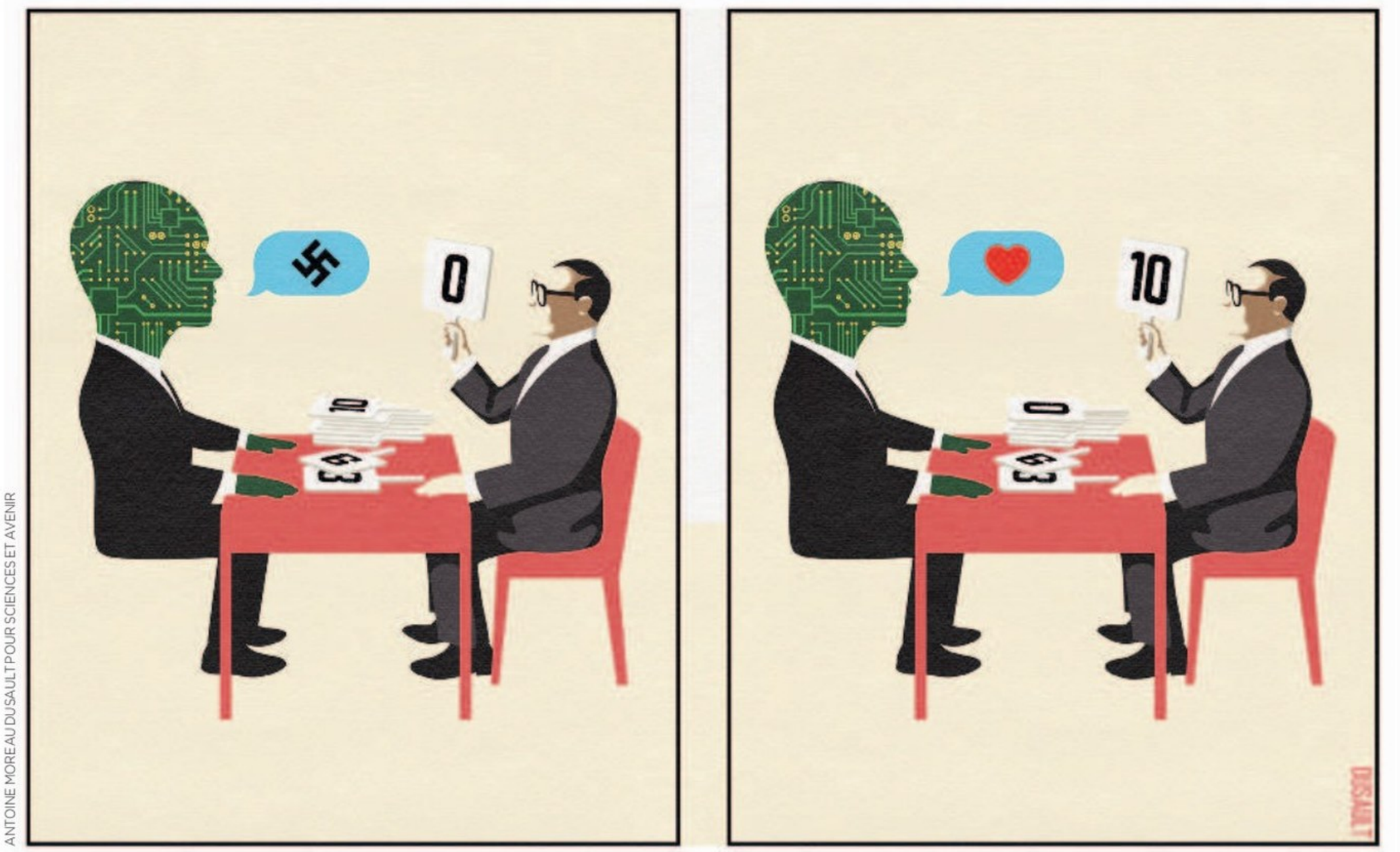
Grâce à lui, les chercheurs pourront savoir si Dimorphos est un monolithe homogène ou un agrégat de gros blocs séparés par des graviers et du sable, voire des espaces vides. « *Une donnée majeure,* souligne Alain Hérique. *Car pour une même énergie d'impact, les modélisations suggèrent que des astéroïdes de diverses structures réagissent de façon très disparate* ». Toutes ces informations présentent de surcroît « *un immense intérêt scientifique* », insiste pour sa part Patrick Michel. Indispensables pour préparer les futures missions de défense planétaire, elles permettront de réaliser aussi « *un pas de géant dans la compréhension des collisions qui ont façonné les planètes et petits corps du Système solaire* », assure le chercheur niçois. ■

Franck Daninos

C. SUZZI/HANS LUCAS/ESA

« Ce sera un pas de géant dans la compréhension des collisions qui ont façonné les planètes et petits corps du Système solaire »

Patrick Michel, spécialiste des petits corps à l'observatoire de la Côte-d'Azur et responsable scientifique d'Hera



ANTOINE MORE AU DUSAULT POUR SCIENCES ET AVENIR

Éduquer les modèles de langage

Le développement des agents conversationnels s'accompagne de méthodes censées leur éviter de générer des contenus choquants ou illégaux. Mais elles sont loin d'être parfaites.

Mis en ligne sur Twitter en mars 2016 par Microsoft, le robot conversationnel Tay n'existe plus mais reste un repoussoir. Pourquoi? Il a été déconnecté au bout de 24 heures, après avoir tenu des propos racistes, antisémites, négationnistes. Il était censé apprendre à répondre à partir de ses interactions avec les internautes. Lesquels ont vite compris comment l'amener à déraper. C'est tout ce que redoutent les développeurs d'agents conversationnels actuels.

Pour éviter ces dérives, la technique la plus en vogue est l'apprentissage par renforcement fondé sur les préférences humaines, ou RLHF (reinforcement learning from human feedback). Elle consiste à faire adopter à l'algorithme les comportements et décisions jugés les plus acceptables par un homme ou une femme. Pour schématiser, le principe est de faire noter par des humains plusieurs réponses apportées à une même question par le modèle. Cette évaluation sert ensuite à bâtir un modèle dit de récompense avec lequel on entraîne une deuxième fois le modèle de langage: celui-ci apprend la

85
testeurs externes
ont utilisé GPT-4o entre mars et juin 2024 pour identifier les risques posés par le modèle.

valeur de ses réponses, ce qui bloque, ou du moins limite, les contenus qui pourraient être jugés mal formulés, choquants, voire illégaux. Le RLHF a d'abord servi aux algorithmes de génération d'images ou pour des bots (robots) jouant à des jeux vidéo, puis OpenAI a eu l'idée en 2019 de l'appliquer à GPT-2.

Bien qu'efficace, cette méthode est loin d'être parfaite, d'où les recherches sur des solutions alternatives. « *Le RLHF nécessite de régler quantité de paramètres, ce qui exige un coût important en calcul et beaucoup d'expertise technique en apprentissage automatique* », estime Archit Sharma, spécialiste du sujet à l'université Stanford (États-Unis). Selon lui, c'est au point que seuls des acteurs de l'envergure d'OpenAI ou DeepMind (filiale de Google) peuvent y avoir recours.

Remplacer les testeurs humains par un algorithme

En mai 2023, le chercheur a présenté une approche plus simple, la DPO (direct preference optimization). « *Classiquement, les modèles de langage génèrent des phrases statistiquement les plus probables* [en regard du prompt, l'instruction donnée à l'IA]. *La DPO réinterprète cette probabilité pour générer une phrase alignée sur les préférences humaines.* » Il n'y a plus besoin de bâtir un modèle de récompense. Le contenu calculé comme le plus probable est aussi le mieux aligné. Les premiers tests montrent des résultats équivalents à ceux issus de la méthode avec apprentissage par renforcement.

Cette approche n'est encore qu'un projet de recherche. Dans une étude publiée en mai, une équipe de chercheurs en IA du Massachusetts Institute of Technology (MIT, Cambridge, États-Unis) et d'IBM Watson proposent, eux, de perfectionner une méthode déjà bel et bien utilisée. À savoir pousser sciemment un modèle de langage à la faute, un peu comme les internautes ont fait avec Tay, mais ici pour débusquer les failles et les corriger. C'est ce que l'on appelle le *red teaming* ou l'équipe rouge *(lire l'encadré)*. Généralement, des testeurs humains s'en chargent. L'idée, ici, est de remplacer ces derniers par un autre modèle de langage multipliant les prompts au modèle cible. Cet algorithme est entraîné par apprentissage par renforcement où il est « récompensé » selon la toxicité des contenus qu'il aura réussi à faire générer par la cible (cette toxicité, dans le cadre de l'étude, a été évaluée par GPT-4 et l'algorithme de classification RoBERT).

Mais la récompense est aussi fonction de la diversité des prompts, sur le fond comme dans la forme : le modèle doit reformuler, changer les mots, etc. Sinon, après avoir réussi à faire déraper la cible, il maximiserait ses récompenses avec des prompts peu ou prou similaires. « *Nous aurions pu entraîner un algorithme de* red teaming *sur une base de prompts susceptibles de générer des contenus indésirables si une telle base existait,* note Zhang-Wei Hong, doctorant du MIT et coauteur de cette étude. *Mais cela impliquerait que des humains aient conçu ces prompts en amont.* » Or, l'enjeu est justement d'aller plus loin que ce que pourraient écrire des humains. Bilan de la technique ? Le *red teaming* automatisé arrive non seulement à provoquer plus de réponses malvenues, mais celles-ci apparaissent plus choquantes. ■ **Arnaud Devillard**

La technique la plus en vogue est l'apprentissage par renforcement fondé sur les préférences humaines

LE MOT DU MOIS

« Red team » (équipe rouge)

Cette notion vient de la cybersécurité et du monde des armées. Cela consiste, pour un commanditaire, à demander de se faire attaquer par des experts se comportant comme des agents hostiles (hackers, soldats ennemis). La défense est assurée par une équipe bleue (*blue team*). L'enjeu est autant de détecter d'éventuelles failles que de voir si la cible résiste. En matière d'IA générative, ces procédés visent à faire déraper l'outil avec les prompts (requêtes) pour identifier des risques de désinformation, de contenus violents, de violation de la vie privée ou du droit d'auteur, de diffusion de contenus illégaux, dangereux, etc. Microsoft et Google y ont recours, Facebook a monté le projet Purple Llama pour sécuriser son modèle de langage Llama. Début août, OpenAI a dévoilé les résultats d'opérations de *red teaming* visant GPT-4o. Bilan : le modèle présente un risque « moyen » lié à sa force de persuasion. Il reste donc des progrès à faire avant d'implémenter l'IA dans tous les appareils grand public…

POUR EN SAVOIR PLUS

La première publication d'opérations de *red teaming* de Google sur ses IA (en anglais) : **sciav.fr/933googlia**

FERNANDO VERGARA / AP / SIPA

Soumis aux restrictions en raison d'une pénurie de la précieuse ressource, les habitants (ici le 16 avril à La Calera, une banlieue de Bogotá) s'approvisionnent en eau potable auprès d'un camion-citerne.

Colombie

La guerre de l'eau est déclarée

C'est l'un des pays les plus pluvieux au monde. Et pourtant, la Colombie, qui accueille cette année la COP16 sur la biodiversité, manque cruellement d'eau ! Chaque épisode de sécheresse met à mal un système hydroélectrique inadapté, notamment dans les zones surpeuplées. Bogotá et ses 8 millions d'habitants vivent désormais au rythme des coupures du robinet. La création d'une police de l'eau apportera-t-elle la solution ?

Par Nicolas Gutierrez C.

Entouré de montagnes boisées, le lac du barrage San Rafael fait grise mine. Perchée sur les Andes à près de 2800 mètres d'altitude, cette grande masse d'eau est une des principales sources de la capitale colombienne, Bogotá. Désormais à moitié vide, elle dévoile des étendues de terre et de pierre qui contrastent tristement avec la verdure qui l'entoure. Deux ans après l'épisode de sécheresse qui a touché la France en 2022, c'est au tour d'un des pays les plus riches en eau d'en manquer. Selon les dernières données de la Banque mondiale publiées en 2020, la Colombie est en effet le pays recevant le plus de pluie au monde ! Depuis des mois pourtant, Bogotá se trouve soumise à des restrictions d'eau drastiques à cause d'une pénurie de cette précieuse ressource. Comment la situation a-t-elle pu se dégrader aussi rapidement ?

« *La Colombie est clairement dans le top 10 des pays les plus pluvieux au monde,* confirme le climatologue de l'université del Rosario à Bogotá, Benjamin Quesada. *Mais cela cache des disparités saisonnières et spatiales, ainsi qu'une grande variabilité selon les années.* » À l'origine de cette forte variabilité : le phénomène El Niño, qui se caractérise par l'apparition d'eaux très chaudes dans la partie est de l'océan Pacifique équatorial. Cette montée des températures a pour conséquence une forte réduction des précipitations en Colombie. Ce phénomène climatique avait démarré en juin 2023 et, ▶

à partir de janvier dernier, a chevauché la saison sèche du pays, ce qui n'a fait qu'aggraver la situation. Au point que les barrages qui alimentent la capitale du pays se sont retrouvés à seulement 19 % de leur capacité en mars.

Cette conjoncture météorologique a été aggravée par d'autres facteurs, notamment la déforestation. Même si ce fléau est en baisse en Colombie ces dernières années, il reste élevé et concernait encore 800 km² en 2023 (près de huit fois Paris). Un véritable désastre écologique qui non seulement affecte le cycle de l'eau à long terme, mais a aussi des conséquences à court terme sur les réserves du pays. « *Quand on remplace des forêts par des pâturages, on a beaucoup plus de sédiments qui arrivent dans les bassins et s'y accumulent au fond, réduisant le volume utile des barrages et diminuant leur capacité de production d'énergie,* explique Benjamin Quesada, qui étudie l'impact de cette sédimentation en Colombie et en France. *Il y a une relation très directe entre le fait de conserver et de protéger les forêts et les économies qui peuvent être faites en maintenance et en kilowattheures.* »

Le gouvernement de Gustavo Petro, premier président de gauche du pays, semble avoir compris l'urgence. Selon le quotidien colombien *El Tiempo*, il devrait annoncer la création d'une police de l'eau lors de la COP16 sur la biodiversité, qui a lieu du 21 octobre au 1er novembre à Cali. Forte de 8000 agents, cette nouvelle administration devra protéger les cours d'eau de la contamination et lutter contre tout ce qui pourrait menacer le cycle de l'eau, y compris la déforestation et l'activité minière illégale.

BRUNO BOURGEOIS

Mais pour les experts, cela ne suffira pas à éviter des pénuries d'eau dans le futur. Car le problème principal serait plutôt l'improvisation des décideurs politiques, qui n'écoutent pas forcément les alertes des chercheurs. « *Dès l'an dernier, nous avions averti la mairie de Bogotá qu'il allait y avoir des problèmes, et donc qu'il fallait prendre des mesures préventives fortes,* révèle Benjamin Quesada. *Malheureusement, comme c'est souvent le cas, ils ont agi au dernier moment.* » À partir d'avril, une fois le niveau des barrages trop bas pour continuer d'ignorer l'urgence, la réponse de la mairie a été drastique : 24 heures de coupure d'eau tous les neuf jours à tour de rôle pour chaque quartier de la ville. Une restriction assouplie à 18 jours à partir de juillet. Une coupure totale de l'eau qui forçait notamment à faire des réserves la veille pour disposer de quoi boire ou cuisiner le lendemain. Nombre d'habitants choisissaient même de quitter le quartier pour la journée afin de travailler et manger ailleurs. Malgré cette contrainte extraordinaire, le niveau des barrages n'atteignait qu'environ 50 % en août, alors qu'il devrait être au-dessus de 70 % pour éviter de nouveaux problèmes l'année prochaine.

LUIS ACOSTA / AFP

À moitié vide, le réservoir d'eau potable que constitue le lac San Rafael, à environ 2800 m d'altitude, peine à alimenter la capitale. Des restrictions d'eau sont régulièrement mises en place par les autorités.

Un système hydroélectrique en tension constante

« *Certes, il est difficile de prévoir avec exactitude ce type d'anomalies climatiques, mais l'on savait que tôt ou tard cela allait arriver. Il aurait fallu s'y préparer,* regrette Marinella Valencia, hydrologue à l'université de Laval (Canada) et à l'université nationale de Colombie. *Ces restrictions drastiques sont plus la conséquence d'un manque de préparation que de la menace climatique elle-même. L'expansion de Bogotá n'a pas été suffisamment planifiée, il y a désormais trop de pression sur un même écosystème.* » Ce qui semble confirmer la lecture sur place du quotidien *El Espectador*, qui a mis en évidence une mauvaise planification de la

part du fournisseur d'eau de la capitale colombienne, EAAB (pour Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá). En 2012, l'entreprise publique a réfléchi à investir pour augmenter ses capacités de production d'eau, mais a finalement renoncé en raison de calculs erronés. Les besoins en eau de cette ville étaient alors estimés à 14 m³ d'eau par seconde, alors que la capacité maximale des barrages qui alimentent Bogotá est de 28 m³/s, ce qui semblait laisser une marge considérable. Or, des experts ont montré que la capacité réelle n'est que de 22 m³/s ; en effet, les barrages ne sont jamais complètement remplis et toute l'eau ne peut pas être utilisée, notamment à cause des sédiments. De sorte que la marge n'était en réalité que de 8 m³/s, et qu'elle a depuis été réduite fortement en raison de l'expansion démographique de la ville. La population de Bogotá a augmenté de près de 800 000 personnes entre 2012 et 2024, pour un total qui approchait les 8 millions d'habitants en 2023.

Ces calculs ne prenaient pas non plus en compte l'impact que des phénomènes comme El Niño et le réchauffement climatique pourraient avoir sur les écosystèmes qui alimentent les réserves d'eau. *« Le système hydroélectrique colombien est en tension constante et il suffit d'un petit grain de sable — une sécheresse ou un phénomène El Niño — pour que la situation devienne critique dans les zones où le besoin en eau est important,* se désole Benjamin Quesada. *Surtout que c'est un petit peu un cercle vicieux. Quand il fait chaud, les gens consomment plus d'eau, les industries consomment plus d'eau, il faut arroser plus, etc. Donc il y a vite un effet boule de neige. »*

Les restrictions les plus sévères pourraient devenir la normalité

Au début des restrictions, la mairie de Bogotá avait déclaré qu'il fallait réduire la demande en eau à environ 15 m³/s afin de permettre aux barrages d'atteindre 70 % de leur capacité maximale avant novembre. Mais l'objectif semble illusoire : pour le moment, la demande stagne à 15,8 m³/s et le niveau des barrages n'augmente plus, passant à nouveau sous la barre de 50 % en septembre. Le maire Carlos Fernando Galán a d'ores et déjà annoncé que la ville devra revenir au cycle plus strict de restrictions, tous les neuf jours dans chaque quartier. Ce qui pourrait devenir la nouvelle norme dans cette ville pourtant entourée de paramos *(lire l'encadré ci-dessus)* et de zones humides comme les *humedales*, des écosystèmes régulièrement inondés d'eau douce.

Malheureusement, la fréquence de ces anomalies climatiques devrait augmenter dans le futur, venant gripper davantage un système déjà à bout du souffle. *« Ce type de scénario n'est plus de la science-fiction, comme certains le pensaient il y a vingt ans »*, souligne Nanée Chahinian, hydrologue à HydroSciences

FERNANDO VERGARA / AP / SIPA

Les « frailejones » des montagnes captent l'humidité des nuages pour alimenter les nappes phréatiques.

ÉCOSYSTÈME

Protéger le paramo pour sauvegarder l'eau

À 3700 mètres d'altitude, un millier de mètres plus haut que le barrage San Rafael, nous atteignons un paysage qui n'existe qu'en Colombie et dans les pays voisins, le paramo. Où les grands arbres sont remplacés par des plantes poilues, les *frailejones* (du genre *Espeletia*), adaptées aux conditions climatiques difficiles de la grande altitude. C'est ici que débute le cycle de l'eau en Colombie, car ces plantes ont le pouvoir de capter l'humidité des nuages grâce à leurs poils pour la diriger vers le sol, alimentant ainsi les nappes phréatiques. Un écosystème essentiel donc, qui a longtemps été mis en danger par l'agriculture.

Ces zones sont désormais protégées par l'État, qui a mis en place des pépinières spécialisées pour les repeupler de *frailejones*. Comme celle du sanctuaire de faune et de flore de Guanentá, dans le département de Boyacá, à l'est de Bogotá. Ici, des agents de l'unité des parcs naturels nationaux de Colombie font pousser 13 espèces de *frailejones*, dont trois qui n'existent que dans ce lieu. *« Les* frailejones *sont fragiles car ils grandissent très lentement, d'environ deux centimètres par an,* nous apprend Leidi Garcia, qui s'occupe de la pépinière. *Pourtant ils sont essentiels, et pas seulement pour l'eau! Ils sont considérés comme des espèces parapluies, car leur conservation protège aussi plusieurs autres espèces. »*

Montpellier. Le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (Giec) prévoit une augmentation des événements extrêmes, donc beaucoup plus de sécheresses, mais aussi plus d'inondations. « *Ces changements risquent d'être très hétérogènes dans l'espace et donc encore plus difficiles à prévoir,* note la chercheuse. *À certains endroits, on va avoir des sécheresses, à d'autres endroits, il y aura des inondations.* » Ce qui requiert une adaptation des infrastructures et des façons de planifier les besoins en eau. « *Ce qu'on savait avant, ce qu'on supposait être une façon de fonctionner il y a vingt ans, trente ans, cinquante ans, ça ne marche plus* », ajoute-t-elle.

Les usagers doivent modifier leur consommation

Pour composer avec cette nouvelle réalité, il faudra non seulement adapter les infrastructures, mais aussi que les usagers adoptent de nouveaux comportements. « *On a besoin de campagnes de sensibilisation pour que les gens commencent à comprendre que la disponibilité de la ressource va diminuer dans le futur* », alerte Marinella Valencia. Or, pour la chercheuse, l'improvisation des décideurs politiques n'aide pas les gens à s'adapter correctement. Elle rappelle par exemple que le début des restrictions a été tellement abrupt que la demande en eau a augmenté durant les premières semaines, car les utilisateurs avaient peur de la pénurie et stockaient de l'eau en excès, générant finalement des pertes importantes. Sans oublier d'autres gaspillages qui n'ont fait qu'aggraver la situation : « *Pendant le rationnement, dans les quartiers les plus aisés, on a vu des gens engager des personnes pour laver un building entier à l'eau, ou des résidences utiliser leurs réserves d'eau constamment, ce qui est difficilement détectable et crée un vrai fossé de classe* », se remémore Benjamin Quesada. Toutes ces pratiques étaient évidemment interdites, et la mairie a essayé de les sanctionner, par exemple avec des amendes pour tout foyer qui utilisait plus de 22 m³ d'eau par mois. Depuis septembre, c'est à partir de 12 m³ par mois que les usagers paieront davantage, dans un ultime effort pour tenter d'atteindre cet objectif de 70 % de remplissage des réservoirs avant novembre.

Cependant, loin de désespérer, les experts voient cette situation plutôt comme une opportunité. « *Le système peut être renforcé et on peut travailler pour améliorer la culture citoyenne des habitants et leur apprendre à utiliser l'eau avec plus de sobriété*, avance avec optimisme Marinella Valencia. *Je crois que c'est une opportunité pour générer une prise de conscience sur notre rapport à la nature et sur sa valeur. Cela va nous permettre d'appréhender à quel point nous sommes vulnérables devant des phénomènes comme El Niño ou le réchauffement climatique.* » Mais en Colombie comme ailleurs, cette crise ne sera une opportunité que si les décideurs politiques apprennent à écouter les conseils des experts. Sans quoi, les vertes montagnes qui entourent le barrage San Rafael risquent un jour, elles aussi, de faire grise mine. ■

PATRICK LACHASSAGNE

VERBATIM

PATRICK LACHASSAGNE

DIRECTEUR D'HYDROSCIENCES MONTPELLIER

« Une police de l'environnement en France »

“La problématique de la ressource en eau est éminemment territorialisée. Il faut compter sur les ressources en eau locales, car transporter de l'eau est très onéreux. Il faut donc viser une adéquation entre la ressource disponible sur place et les besoins locaux. Si l'on veut tenir compte du changement climatique par exemple, il faut donc prévoir la disponibilité future en eau localement et, si l'on voit que la ressource va diminuer ou que la fréquence des sécheresses va augmenter, on sait qu'il faudrait conserver plus d'eau en réserve lors des périodes humides (barrages ou nappes d'eau souterraine). Donc, consommer moins d'eau pour en maintenir plus en réserve et ainsi anticiper la sécheresse à venir.
Malheureusement, pour les décideurs politiques, il est plus aisé de gérer une crise : les mesures contraignantes sont plus faciles à accepter lorsque tout le monde est dans la difficulté.
Mais il faut surtout mettre en place des politiques d'adaptation. En France, il y aura une diminution globale de la ressource en eau. Mais nous sommes dans un pays tempéré, avec une démographie qui augmente peu ; cette diminution en eau sera faible et les besoins n'augmenteront pas considérablement. Pour faire respecter des politiques d'adaptation, en plus des actions d'explication auprès de la population, la police de l'environnement sera très utile, car elle a une mission de police de l'eau et est chargée de faire respecter la législation sur l'eau en France. Notamment pour limiter les conflits d'usage et s'assurer que tout le monde puisse avoir l'eau dont il a besoin pour ses activités.”

Propos recueillis par N. G. C.

RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

Liberté
Égalité
Fraternité

ADEME

AGENCE DE LA TRANSITION ÉCOLOGIQUE

Dessin : www.Mai-Lan.fr

Inventez le monde de demain :
Faites votre thèse avec l'ADEME

PROGRAMME THÈSES

Dans le cadre d'un partenariat entre un étudiant, son laboratoire d'accueil et un cofinanceur public ou privé, l'ADEME finance des thèses pendant 3 ans pour contribuer à la transition écologique.

WWW.ADEME.FR / THESES

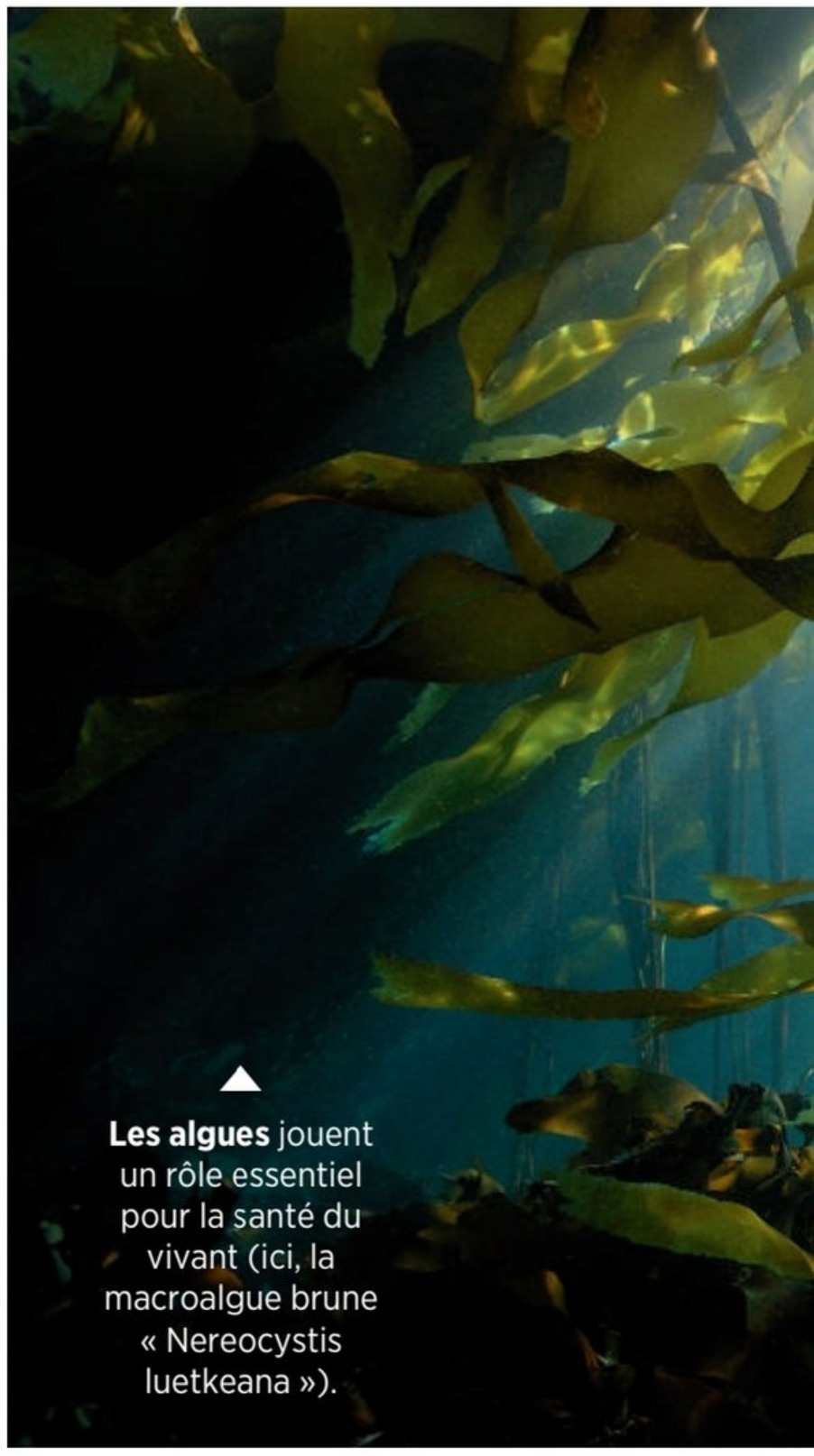
Pour en savoir plus

Et poser vos questions :
www.ademe.fr

GRAND OCEAN

Notre avenir passe par les algues

Le festival Grand Océan, dont la 3e édition s'est tenue du 13 au 15 septembre à Cherbourg, a réaffirmé l'intérêt de protéger et de développer les algues pour leur valeur nutritionnelle et leur rôle de pompes à carbone.



BRANDON COLE / BIOSPHOTO

Les algues jouent un rôle essentiel pour la santé du vivant (ici, la macroalgue brune « Nereocystis luetkeana »).

En France, les algues n'ont toujours pas la cote : au-delà de leur apparence visqueuse et gluante, elles doivent notamment leur mauvaise réputation à la prolifération d'algues vertes sur les côtes bretonnes. Une nouvelle fois, le festival Grand Océan, dont la 3e édition s'est tenue du 13 au 15 septembre à Cherbourg, a cherché à les réhabiliter. « *Quittons cette image des algues mortes et échouées sur les plages pour les imaginer vivantes dans la colonne d'eau* », exhorte Mélanie Cueff, ingénieure de recherche CNRS et responsable scientifique pour la Coalition mondiale des algues. Car les mauvaises algues n'existent pas ! « *Les algues vertes dont souffre la Bretagne, de même que les sargasses dans les Caraïbes, sont les symptômes d'une agriculture toxique et intensive et non le problème en soi* », objectait déjà sur la même scène en 2022 Vincent Doumeizel, conseiller pour les océans au Pacte mondial des Nations unies.

Les algues constituent un ensemble d'organismes photosynthétiques extrêmement divers. Les milliers de variétés sont réparties en deux catégories : les macroalgues et les microalgues. Parmi les premières, on distingue les algues brunes *(Phaeophyceae)*, communément appelées varech, des algues vertes *(Chlorophyta)* et rouges *(Rhodophyta)*. Les microalgues, elles, sont des organismes microscopiques comme le phytoplancton, au fondement de la chaîne alimentaire marine.

Julie Desnoulez est l'une des nombreux entrepreneurs qui ont décidé d'exploiter le potentiel des macroalgues. Avec son entreprise Hep Ken, elle cherche à démocratiser la consommation de ces organismes en vendant des algues bretonnes 100 % bio, élevées et récoltées en zone Natura 2000. C'est que les algues sont de véritables bombes nutritionnelles : vitamines, protéines, zinc, iode, oméga 3 à longue chaîne, source de fibres et de minéraux… « *Le seul aliment terrestre avec autant de protéines, oligoéléments, vitamines* », selon elle. Exhausteur de goût, accélérateur de cuisson, elles rendent aussi les aliments plus digestes, autant de qualités recherchées par la jeune créatrice qui se lance dans ce secteur florissant.

Les composés des algues nourrissent en fait déjà les filières agroalimentaires, mais aussi cosmétique et pharmaceutique. Dans notre crème glacée estivale, dans les yaourts et les confitures, on retrouve l'algue rouge pour ses propriétés texturantes et gélifiantes, la verte dans les gommages, lotions et crèmes, tandis que la brune est l'apanage de l'industrie pharmaceutique, qui l'utilise dans nombre de compléments alimentaires pour ses molécules bioactives aux propriétés antioxydantes, anti-inflammatoires et cicatrisantes.

Les algues pourraient même ouvrir la voie à l'élaboration de substituts durables aux plastiques. De nombreuses start-up travaillent sur le sujet, comme Notpla. Quant aux microalgues, elles sont utilisées en agriculture, car grâce à leur teneur en phosphore et potassium, ce sont des fertilisants ou « biostimulants » naturels. Non seulement elles permettent de remplacer les intrants chimiques, mais elles rendent aussi les plantes plus résistantes au sel, à la sécheresse, au froid, etc. Enfin, les algues servent à la nutrition animale. « *Elles améliorent leur système immunitaire, réduisant ainsi l'utilisation d'antibiotiques* », selon Vincent Doumeizel.

À Cherbourg, c'est encore dans un tout autre domaine que les intervenants ont laissé transparaître les promesses des algues : celui de la santé de l'océan. Réchauffement climatique, acidification des océans et désoxygénation : voici le ▶

OLIVIER ROELLINGER

ANCIEN CHEF ÉTOILÉ, COMPOSITEUR D'ÉPICES

Apprendre à cuisiner les coquillages et les algues

“Le garde-manger marin est malade. On a cessé de consommer du thon rouge, du bar l'hiver, de l'anguille… Nous nous sommes rabattus sur le lieu, le maquereau, puis le chinchard, qui sont fragiles maintenant. Que reste-t-il aux cuisinières et aux cuisiniers ? L'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (Anses) dit qu'il faut manger du poisson deux fois par semaine. C'est aberrant : nous n'arriverons jamais à nourrir la population ainsi. Et est-ce si bon pour la santé tant ils sont pollués par les métaux lourds, les dioxines, les PCB ? Comment entendre cette recommandation alors que pour les mamans, les futures mamans, les enfants de moins de 3 ans c'est une fois par mois maximum ? Il ne faut surtout pas abandonner nos amis pêcheurs, qui font énormément d'efforts. Mais il nous faudra manger plus de coquillages que de poissons. Et il y a une chose formidable, ce sont les algues, pleines de protéines, d'oligo-éléments, de sels minéraux. Il ne faut pas être nostalgique. La jeunesse va imaginer une autre cuisine qui sera délicieuse et qui fera du bien à la santé de chacun et de la planète.”

MOSCHETTI/REA

GRAND OCEAN

« *cocktail pour un effondrement écologique* ». Tels sont les mots de Fabrice Pernet, chercheur à l'institut français de recherche entièrement consacré à la connaissance de l'océan (Ifremer) à Brest, spécialisé en écologie et physiologie des organismes marins. Les conséquences sont dramatiques : canicules marines — avec des anomalies de température de +5 °C sur les îles normandes depuis 2012 —, mais aussi désoxygénation de l'eau, conséquence directe du réchauffement, et acidification. Le dioxyde de carbone atmosphérique, en se dissolvant dans l'eau de mer, forme de l'acide carbonique, corrosif pour le calcaire. « *Quand le pH de l'eau de mer diminue et que son acidité augmente, le calcaire qui compose les coquilles de coquillages se dissout* », explique le biologiste marin.

Les huîtres menacées par l'acidification de l'océan

L'acidification de l'océan devrait augmenter de l'ordre de 150 % à l'horizon 2100. Un scénario catastrophique : c'est non seulement la disparition annoncée des organismes calcifiants (coraux, oursins, coquillages), mais aussi des écosystèmes très appauvris, et une sixième extinction de masse amorcée aujourd'hui liée à cette perte de biodiversité massive. Plusieurs suivis du pH de l'eau de mer dans différentes baies en France ont montré que le bassin d'Arcachon, très connu pour sa production d'huîtres, pourrait subir cette acidification de plein fouet. Naturellement, des épisodes d'eaux corrosives pour les coquillages se produisent normalement quatre à dix jours par an. Or, ils pourraient se produire 10 % du temps à l'horizon 2050. « *Un mois et demi par an pendant lequel, quand vous remettez un coquillage à l'eau, la coquille aura plus tendance à se dissoudre qu'à se fabriquer* », affirme Fabrice Pernet. D'ici à 2100, cette fréquence pourrait être de 50 % et annoncer la fin de la conchyliculture.

Le transfert du CO_2 de l'atmosphère vers l'océan se produit selon deux mécanismes : l'un est physique, l'autre biologique. Le premier, qui est le plus important, permet à environ neuf dixièmes du CO_2 atmosphérique de passer dans l'océan par simple dissolution du gaz dans l'eau de mer ; il est ensuite transporté vers les fonds au gré des courants marins. Le second, qui représente 10 % de l'accumulation du carbone dans les océans, repose sur la photosynthèse réalisée par le phytoplancton. À sa mort, une partie de ce plancton tombe au fond de l'océan et sédimente, séquestrant ainsi le carbone dans les profondeurs.

« *Avec une surface équivalente à celle de la forêt amazonienne, on estime que la productivité des forêts d'algues sauvages le long de l'ensemble des côtes rocheuses de la planète serait deux fois supérieure pour une même unité de surface !* », expliquait le biologiste marin Philippe Potin

KIET NGUYEN

« On produit autant d'algues dans le monde que de crustacés et de poissons aujourd'hui »

Mélanie Cueff, ingénieure de recherche CNRS, responsable scientifique pour la Coalition mondiale des algues

99 % de la production mondiale d'algues est réalisée par culture, essentiellement en Asie (ici à Xiapu, au sud-est de la Chine).

CONNECT IMAGES / AFP

SENSIBILISATION

La déclaration des sages de l'édition 2024

C'est devenu un rendez-vous de Grand Océan : un comité de « sages » se réunit en préambule pour adopter une déclaration solennelle. Cette année, elle était entièrement consacrée à un thème phare du festival : le littoral. Ce comité était composé de Robert Calcagno, directeur général de l'Institut océanographique de Monaco (fondation Albert-Ier, prince de Monaco), Hélène de Tayrac-Senik, présidente du Salon international de la plongée sous-marine, Valérie Masson-Delmotte, directrice de recherche au CEA, membre de l'Académie des technologies, et Olivier Roellinger, compositeur d'épices aux Maisons de Bricourt.

▸ **LE LITTORAL C'EST NOUS !** Rencontre de la terre et de la mer, rencontre d'eau salée et des eaux douces…

▸ **LE LITTORAL MÉRITE D'ÊTRE MIEUX CONNU ET RECONNU.** Pour sa beauté, sa richesse, et la manière dont nous l'affectons et en dépendons.

▸ **LE LITTORAL VA INDÉNIABLEMENT CHANGER.** Anticipons les transformations au bénéfice de la biodiversité et du bien-être humain.

▸ **LE LITTORAL NÉCESSITE DES FINANCEMENTS AMBITIEUX.** Une transparence, un suivi de la qualité des eaux et des aires marines véritablement protégées.

▸ **LE LITTORAL DEMANDE UNE VISION PARTAGÉE.** Et des engagements courageux. Nous avons tous un rôle à jouer, que l'on vive ou non près des côtes !

à Grand Océan en 2022. Et Vincent Doumeizel d'ajouter : « *Certaines espèces d'algues peuvent pousser de 40 centimètres par jour et atteindre 60 mètres de haut. On parle d'une véritable forêt marine, qui absorbe donc beaucoup de carbone et qui va renvoyer une partie de ce carbone au fond des océans.* » Ces organismes sont de véritables pompes à carbone.

Bien sûr, la culture d'algues massive ne compensera jamais nos émissions de CO_2 actuelles. « *Si on couvrait à peu près 20 % de l'océan avec des algues marines, on capturerait au mieux une gigatonne de CO_2, donc un milliard de tonnes de CO_2 par rapport aux 40 que l'on émet chaque année* », tempère Fabrice Pernet. Ce qui nécessiterait de mettre en culture plus d'un million de kilomètres carrés dans les zones économiques exclusives les plus productives, dans le Pacifique équatorial. À l'échelle locale en revanche, les algues associées à des coquillages dans des petits bassins de production permettraient de rendre des filières plus résilientes vis-à-vis du changement climatique, en limitant l'acidification de l'eau de mer. Elles captent également la pollution à la sortie du port d'Amsterdam (Pays-Bas) et les excès de nutriments dans les élevages de saumons en Norvège.

Cultiver les algues de façon durable

Dans le monde aujourd'hui, 99 % de la production d'algues est réalisée par culture. « *Elle représente plus de 35 millions de tonnes […], on produit autant d'algues dans le monde que de crustacés et de poissons aujourd'hui* », affirme Mélanie Cueff. En revanche, en France, les algues sont encore issues, pour la quasi-totalité de la récolte, d'espèces sauvages dans leur milieu naturel, en mer ou sur le rivage. Pourtant, tout prête à penser que les algues deviendront une ressource indispensable dans les années à venir. Reste à les cultiver de façon durable, en préservant l'équilibre de cet écosystème, tout en protégeant les espèces sauvages. L'adaptation ne peut se faire sans atténuation, souligne Fabrice Pernet, sans quoi nos efforts iraient droit dans le mur. D'ailleurs, certaines espèces d'algues sont déjà menacées : c'est le cas d'une algue brune d'un grand intérêt à la fois écologique et économique, *Laminaria digitata*, qui pourrait disparaître de certaines zones côtières européennes dès 2050 dans le cas d'un réchauffement climatique modéré à fort. ■

Orphée Daillet

Optimiser l'autonomie et la recharge requiert de maîtriser la gestion de l'énergie, qui se pilote par le smartphone.

WILLIAM CROZES - CONTINENTAL PRODUCTIONS

5 questions pour relancer le véhicule électrique

Malgré les incitations fiscales et les progrès en matière d'autonomie, la voiture électrique peine encore à convaincre à grande échelle. Elle doit, pour cela, lever différents freins à l'achat comme à l'usage.

Mathieu Chevalier, avec Agence Forum News

1 À quand l'électrique « low cost » ?

Le coût à l'achat des voitures électriques reste un des principaux obstacles à leur diffusion massive. D'autant que les aides attribuées se réduisent d'année en année : de 7000 euros en 2021 à 4000 euros cette année (à condition que le véhicule coûte moins de 47 000 euros). Aussi, les constructeurs travaillent sur une voiture électrique *low cost*, sous les 20 000 euros hors bonus. La clé d'un modèle abordable réside dans la batterie. Bonne nouvelle : le prix de celle-ci a chuté de 90 % en quinze ans selon BloombergNEF (cabinet spécialisé dans la transition énergétique). En 2008, l'agence évaluait ce tarif à 1415 dollars par kWh (964 euros/kWh au taux de change de 2008) ; en 2023, il a fondu à 139 dollars/kWh (128 euros/kWh). Le coût d'une batterie de 50 kWh (celle d'une Peugeot e-208 par exemple) est ainsi passé de 48 200 euros à 6650 euros. Une tendance qui devrait se poursuivre, les prévisions tablant sur 80 dollars/kWh (72 euros/kWh) d'ici à 2030. Hausse des volumes de production, progrès technologiques et baisse des tensions sur les matières premières expliquent cette tendance de long terme. Les prix des électriques devraient donc en profiter.

2 La peur de la panne est-elle une fatalité ?

L'arrivée de la technologie électrique a réintroduit, pour l'automobiliste, la peur de la panne. Et lorsque la batterie est à plat, impossible de la dépanner avec un simple Jerrican ! Améliorer l'autonomie est un des moyens de rassurer les conducteurs. Les batteries lithium-ion utilisent deux chimies : NMC (nickel-manganèse-cobalt) ou LFP (lithium-fer-phosphate). La technologie NMC offre, dans des conditions idéales, environ 600 km d'autonomie pour une capacité de 70 kWh. Remplacer le graphite des anodes par du silicium permettrait d'augmenter la densité énergétique (donc le rayon d'action) de 20 %, une piste suivie par le CNRS.

Pour les batteries LFP (autonomie d'environ 550 km pour 70 kWh), c'est l'utilisation de manganèse qui serait synonyme d'amélioration de la densité énergétique. Le chinois Gotion High-Tech annonce une hausse de 190 Wh/kg à 240 Wh/kg. Mais la rupture technologique « espérée » réside dans la technologie de batterie dite tout-solide. En remplaçant l'électrolyte liquide par un composé inorganique solide, il pourrait y avoir un gain d'autonomie de 50 %.

3 Sera-t-il possible de charger en 10 minutes ?

Pour charger rapidement une batterie, de nombreux critères entrent en compte : puissance de la borne, capa-

PLEIN CAP CROISIÈRES

UNE MOSAÏQUE DE CULTURES

CANARIES & CAP VERT

DU 12 AU 24 FÉVRIER 2025

À PARTIR DE

3 990 € / pers.

AU DÉPART DE PARIS

Retrouvez tous les détails de cette croisière sur www.plein-cap.com

Renseignements et réservations

04 93 20 21 20 ou info@plein-cap.com

Crédits photos : shutterstock.com/Samuel Borges Photography

à bord du Ms Hamburg

cité de la batterie et même diamètre du câble. Les véhicules avec les temps de recharge les plus rapides promettent une immobilisation d'un peu plus de 20 minutes (de 10 % à 80 % de la batterie) sur une borne ultrarapide (250 kW ou plus). Pour atteindre ces résultats, les marques utilisent des batteries ayant des tensions de 800 V, contre 400 V habituellement. La puissance de charge (en watt) se calcule en connaissant la tension (en volt) et l'intensité (en ampère) selon la formule suivante : V × A = W. En doublant la tension (V), on peut ainsi diviser par deux l'intensité (A) et obtenir la même puissance (W). Cette baisse de l'intensité a pour intérêt d'éviter que les câbles ne chauffent exagérément et ne contraignent à limiter la puissance délivrée.

Les progrès en la matière sont constants : le chinois Zeekr vient d'annoncer une batterie LFP capable de charger de 10 à 80 % en seulement dix minutes. Mais pour cela, il faut la brancher sur une borne ultrarapide (800 kW)… qui n'existe pas encore sur le bord des routes (350 kW maxi sur autoroute) !

4 Comment faciliter l'utilisation ?

Optimiser l'autonomie et la recharge requiert de maîtriser la gestion de l'énergie, qui se pilote par un smartphone ou les systèmes embarqués dans les véhicules. Lors d'un long trajet, il sera ainsi indispensable de programmer le GPS ou de passer par une application spécifique. Cela permettra de planifier les étapes : il est parfois plus intéressant de s'arrêter peu de temps sur une borne lente pour rejoindre la borne rapide suivante.

Il sera aussi possible de programmer le niveau d'énergie souhaité à l'arrivée, histoire de ne pas s'y retrouver avec quelques kilomètres d'autonomie. Les planificateurs d'itinéraire intégrés aux véhicules sont utiles pour lancer la préchauffe de la batterie à l'approche d'une borne : cela réduira le temps de charge. Enfin, pour vérifier si les bornes visées sont libres et fonctionnelles, il faudra souvent croiser les sources d'information, GPS embarqué (sur toutes les électriques) et applis (Chargemap, ABRP, Google Maps…) à télécharger sur smartphone.

5 Les conducteurs doivent-ils être formés ?

Si 30 % des conducteurs de véhicules électriques veulent revenir au thermique (étude McKinsey dans 15 pays du monde), c'est aussi parce qu'ils n'ont pas été formés. Pour en optimiser l'usage, une voiture électrique ne doit pas être utilisée comme une thermique. C'est tout d'abord en ville et sur les routes secondaires que cette énergie est la plus efficiente, grâce aux nombreuses phases de freinage qui rechargent la batterie. Sur autoroute, en revanche, l'accélération quasi continue pour maintenir une vitesse élevée entame le rayon d'action (inférieur de 20 % à la moyenne annoncée). Dans tous les cas, l'autonomie promise sera, dans la réalité, inférieure de 20 %… voire plus s'il fait très chaud ou très froid. Au volant, proscrire les fortes accélérations et le recours au chauffage ou à la climatisation fera gagner de précieux kilomètres. Lorsque le véhicule est en charge, préchauffer ou préclimatiser l'habitacle évitera de « tirer » sur la batterie par la suite. ■

AVIS D'EXPERT

MARC FERRÉOL

DIRECTEUR DE LA DIVISION DÉMANTÈLEMENT DE SUEZ

« Bientôt une batterie neuve à partir d'une recyclée »

SP

Que signifie l'objectif de circularité des batteries ?

C'est l'objectif de produire, dès 2026, des batteries neuves qui utiliseront plus de 95 % de métaux stratégiques — c'est-à-dire le nickel, le cobalt, le lithium et le manganèse — issus d'une vieille batterie. Il s'agit donc de mettre en place un cercle vertueux.

Quelles sont les quantités à traiter ?

Pour le moment, le marché est très faible mais il sera exponentiel : en 2030, il y aura 400 000 tonnes de batteries à recycler au niveau européen et, en 2040, on table sur 3 millions de tonnes ! Dès 2026, nous serons capables de traiter 200 000 batteries par an, issues de véhicules qui ont été vendus il y a dix ou quinze ans.

Quelle est la plus grosse difficulté ?

Ça n'est pas le recyclage en lui-même mais la partie logistique, sachant qu'un pack de batterie pèse plus de 300 kg et fait environ 1,5 m². Il faut optimiser la chaîne de collecte de façon à minimiser ce poste dans le coût total du recyclage et les émissions de CO_2 liées. Aujourd'hui, on fonctionne selon une logique de région de densité de population.

Au-delà du recyclage, y a-t-il d'autres enjeux ?

Il y en a deux principaux.

Le premier est un enjeu de réindustrialisation : nous installons par exemple avec notre partenaire Eramet une usine dans la « vallée de la batterie », à Dunkerque.

Le second est de tendre vers l'indépendance de l'Europe en matière de matériaux stratégiques, entièrement recyclés à terme. C'est réaliste mais cela va prendre du temps. ■ **Propos recueillis par M. C.**

PUBLICITÉ

Fonctionnement du cerveau

Mémoriser, raisonner, anticiper, planifier, comprendre… les capacités du cerveau sont illimitées.

Au rythme du cerveau

Le cerveau émet en permanence des ondes dont la fréquence dépend de son activité. Eveil, sommeil, phase intense de réflexion : pour chaque état cérébral, l'activité neuronale est caractérisée par un type d'onde.

Ondes alpha, bêta, gamma : leur rôle est complexe et leur émission par le cerveau dépend de nombreux facteurs, comme l'état psychologique ou encore l'alimentation.

Des études récentes ont par exemple montré le lien étonnant entre Thé vert et ondes alpha. Les feuilles de Thé vert contiennent naturellement une substance appelée L-théanine. Malgré son nom, elle n'a aucun lien avec la théine et ne provoque aucune excitation, bien au contraire. La L-théanine régule la production d'ondes alpha : en situation d'effort intellectuel prolongé, elle est capable de diminuer leur production par le cerveau, ce qui favorise la mémorisation et la concentration. À l'inverse, si le cerveau se trouve en phase d'endormissement, elle stimule leur émission, d'où un effet relaxant propice au sommeil.

Théorie des signatures

La Théorie des Signatures était une méthode d'observation dans l'Antiquité, selon laquelle l'aspect des plantes était une indication de leurs bienfaits pour le corps. La science moderne a depuis confirmé l'efficacité de certaines plantes sur la partie du corps à laquelle elles ressemblent. Ainsi débarrassée de sa coque, la Noix ressemble fortement à un cerveau. Elle est riche en Omegas et en antioxydants, et plusieurs études ont montré ses bienfaits sur la mémoire.

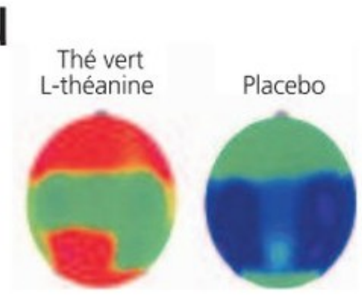
Indispensable irrigation

Le cerveau est incapable de constituer des réserves, et doit donc être alimenté en permanence en glucose. Celui-ci est apporté grâce à un vaste réseau de capillaires, de petits vaisseaux sanguins qui permettent d'irriguer efficacement l'ensemble du cerveau. Leurs fines parois laissent passer le glucose mais aussi l'oxygène indispensable au bon fonctionnement du cerveau. En effet, quelques minutes seulement sans oxygène y entraîne des lésions irréversibles. Là encore, l'alimentation et le mode de vie en général jouent un rôle primordial. La consommation d'aliments riches en antioxydants qui protègent les capillaires, et plus spécifiquement en polyphénols, influence directement le fonctionnement cérébral. Les recherches convergent notamment sur le Pin maritime, dont l'écorce renferme de grandes quantités de proanthocyanidines ou OPC, des polyphénols capables de stimuler la microcirculation sanguine dans les capillaires.

B comme bénéfiques

Le cerveau utilise aussi une multitude de vitamines et minéraux pour fonctionner. Un apport suffisant en vitamines B est particulièrement bénéfique pour maintenir des fonctions cognitives normales (mémoire, concentration, attention). La vitamine B5 par exemple est essentielle à la production de neurotransmetteurs, des substances chimiques qui permettent aux signaux électriques de passer d'un neurone à l'autre pour faire circuler l'information.

Le cerveau passé au scanner



L'activité cérébrale peut être observée grâce au scanner qui met en évidence les zones activées en fonction de l'état dans lequel se trouve le cerveau. La consommation de L-théanine (en rouge) active les zones de la mémoire et de la concentration. Sans L-théanine, ces zones restent inactives (en bleu). Les nombreux travaux de recherche effectués sur le fonctionnement du cerveau ont permis de mettre au point des solutions pour améliorer les fonctions cognitives et les performances intellectuelles. Le laboratoire de recherche végétale New Nordic a mis au point une formule complètement naturelle à base de plantes et vitamines. Baptisée **Cerveau Clair**, elle contient des extraits concentrés de Thé vert, de Noix, de Pin maritime et de Grenade, associés à des vitamines et de l'Iode pour optimiser les performances cérébrales. Ces actifs sont capables d'atteindre le cerveau en quelques heures et sont efficaces sur le long terme. Ils sont donc indiqués pour stimuler les capacités intellectuelles, la concentration et la mémoire, notamment en période de révisions ou d'examens, mais aussi pendant des programmes de plusieurs mois. Les actifs de **Cerveau Clair** atteignent rapidement le cerveau, pour une efficacité en moins d'une heure. Réservé aux adultes de plus de 15 ans.

Des conseils ?

Les experts New Nordic vous répondent au **01 85 42 32 32** ou sur **www.vitalco.com**

Disponible en pharmacie

Cerveau Clair 60 et 120 cp sont disponibles grâce aux codes **ACL 295 18 63** et **636 08 99**

Rêve lucide

Prenez le contrôle de vos nuits !

Voler comme Superman, discuter avec Albert Einstein ou s'entraîner à un sport… tout en dormant ! C'est possible grâce à la technique du rêve lucide, avec laquelle on parvient à maîtriser les événements de son sommeil. Un état de conscience très particulier qui fait l'objet d'études scientifiques pointues et révèle des effets surprenants.

Dossier réalisé par Cécile Coumau
ET Guillaume Jacquemont
illustrations : Sébastien Plassart /
Costume3pièces pour Sciences et Avenir

ÉTUDES
Comment maîtriser ses rêves
p. 56

EXPÉRIENCES
4 découvertes réalisées grâce au rêve lucide
p. 59

DÉMONSTRATION
Un potentiel créatif décuplé
p. 61

ENTRETIEN
« Les rêves jouent un rôle de régulation émotionnelle »
p. 63

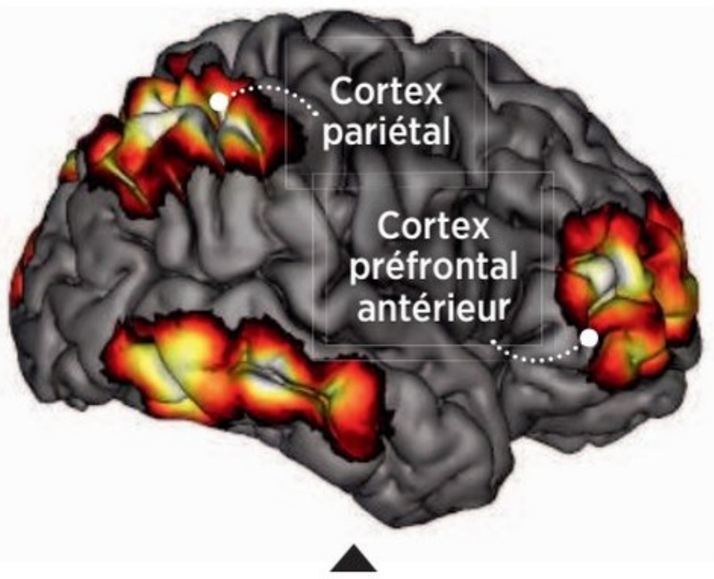
SANTÉ

Neurosciences

Comment maîtriser ses rêves

Les études scientifiques sur les rêves lucides se multiplient : elles permettent de comprendre la façon dont le cerveau crée cet état de conscience fascinant. Les bénéfices potentiels peuvent être variés.

Aimeriez-vous vous envoler ? Pas dans un avion ou un hélicoptère, mais par le seul pouvoir de la volonté. L'expérience serait enivrante : monter à des hauteurs vertigineuses, planer au-dessus de paysages magnifiques, vous accorder quelques loopings… Bonne nouvelle : c'est possible ! Du moins, si vous parvenez à atteindre le rêve lucide, un état de conscience très particulier où un dormeur sait qu'il rêve et parvient en partie à maîtriser les événements.
Dans cet état, vous êtes à la fois conscient de vivre une illusion et totalement plongé dedans — un peu comme lorsque vous regardez un film, en cent fois plus fort. Connu depuis l'Antiquité, il a longtemps suscité le débat, mais son existence est aujourd'hui solidement attestée. « *Lors de la dernière décennie, le rêve lucide s'est de plus en plus imposé dans la recherche "mainstream" sur le sommeil et le nombre d'études sur le sujet est en train de bondir* », écrivent en 2024 le neuroscientifique néerlandais Martin Dresler et ses collègues, dans la revue *Neuron*. Ces études ouvrent à chacun les portes du rêve lucide, tout en clarifiant la façon dont le cerveau crée cet état de conscience fascinant et en précisant ses bénéfices potentiels. Alors, tenté par l'expérience ?
Sans effort particulier pour l'induire, le rêve lucide survient rarement : si un peu plus de la moitié des gens en ont déjà fait un au moins une fois dans leur vie, la proportion de ceux qui l'atteignent plusieurs fois par semaine est plutôt de l'ordre de 1 %. Pour maximiser ses chances, mieux vaut donc pratiquer l'une des multiples techniques développées dans ce but. Selon les chercheuses chinoises Shuyue Tan et Jialin Fan, qui les ont passées en revue en 2022, celle dont l'efficacité est la mieux validée scientifiquement consiste à se réveiller au milieu de la nuit pour tenter ce qu'on appelle une « induction mnémonique du rêve lucide » (Mild, pour Mnemonic induction of lucid dreams).
Commencez par régler votre réveil environ cinq heures après votre coucher : lorsqu'il sonnera, vous aurez une bonne chance de vous trouver dans une phase dite de sommeil paradoxal, où se produisent généralement les rêves lucides. Essayez alors de vous souvenir d'un songe — celui dans lequel vous étiez plongé ou, le cas échéant, celui d'une nuit précédente — et traquez les éléments impossibles ou anormaux, en vous disant chaque fois : « *Je rêve !* » Puis tentez de vous rendormir, en visualisant votre songe et en vous répétant mentalement la phrase : « *La prochaine fois que je rêverai, je veux me souvenir de reconnaître que je suis en train de rêver.* »



Pendant le rêve lucide, tout un réseau du contrôle et de la conscience de soi s'activerait, incluant le cortex préfrontal antérieur et le cortex pariétal. Cette image correspond à l'une des seules fois où l'on a réussi à le visualiser à l'IRMf.

DRESLER ET AL. 2012

Mobiliser la mémoire prospective

Le principe de cette technique est de mobiliser la mémoire prospective, grâce à laquelle on se souvient de faire quelque chose dans le futur. Or, cette mémoire fonctionne mieux quand on a préalablement créé des associations mentales : pour penser à acheter du pain, visualisez la boulangerie en formulant cette intention, qui devrait alors vous revenir automatiquement lorsque vous passerez devant la devanture exposant des brioches. De même, la technique Mild revient en quelque sorte à se dire : « *La prochaine fois que je discute avec un chat volant, je veux me souvenir de réaliser que c'est un rêve !* »
Vous pouvez aussi combiner cette technique avec celle du « test de réalité » : cinq à dix fois par jour, demandez-vous si vous êtes endormi ou réveillé, inspectez les alentours en quête d'éléments

étonnants, puis tentez une action normalement impossible, comme passer votre main droite à travers votre main gauche. Si vous y parvenez, c'est que vous êtes en train de rêver ! L'objectif est d'automatiser ce type de test, afin de penser à l'effectuer en rêve. Dans une étude publiée en 2017 par le chercheur australien Denholm Aspy, 53 % des participants qui ont combiné tests de réalité et technique Mild pendant une semaine ont réussi à faire au moins un rêve lucide, et certains bien davantage. Que se passe-t-il alors dans le cerveau ? Le déterminer n'a rien de facile, car la rareté des rêves lucides rend peu probable leur survenue dans des appareils d'imagerie (IRMf). D'autant plus qu'ils sont très bruyants : « *C'est un peu comme dormir au milieu de coups de marteau* », explique la neurologue Isabelle Arnulf, qui dirige l'unité des pathologies du sommeil à l'hôpital de la Pitié-Salpêtrière, à Paris. Martin Dresler et ses collègues y sont tout de même parvenus. D'autres ont utilisé des techniques de mesure moins contraignantes, comme l'électroencéphalographie — avec laquelle on pose juste des électrodes sur le crâne des dormeurs. L'examen des différences cérébrales entre ceux qui font fréquemment des rêves lucides et ceux qui n'en font pas donne aussi quelques indices. Si les résultats sont encore préliminaires — et parfois controversés —, nous commençons à entrevoir l'activité du cerveau

UNIVERSITÉ DE BERNE

« Pour voler, certains rêveurs lucides décollent “à la Superman”, d’autres se servent d’un objet, à l’instar d’Aladin sur son tapis volant »

Daniel Erlacher, chercheur à l’université de Berne (Suisse)

lucide. Plusieurs zones très peu actives pendant le sommeil paradoxal semblent retrouver de la vigueur. C’est le cas du cortex préfrontal antérieur *(voir l’illustration p. 56)*, qui participe à la métacognition (la connaissance de ses propres processus cognitifs) et à la réflexion sur soi. *« Nous avons notamment trouvé une baisse des ondes lentes dites delta dans cette zone pendant le rêve lucide »*, relate Isabelle Arnulf.

S’entraîner oniriquement à un sport accroît ses performances

Or, ces ondes lentes sont associées à la survenue cyclique de « silences neuronaux », périodes durant lesquelles les cellules nerveuses ne s’allument plus, de sorte que leur décroissance signe une forme de réactivation du cortex préfrontal. Cette dernière région comprend par ailleurs davantage de matière grise en plusieurs endroits chez ceux qui font souvent des rêves lucides.

Autres zones qui sortiraient de leur léthargie pendant le rêve lucide : le précunéus et le cortex pariétal, également impliqués dans la réflexion sur soi, mais aussi dans le sens de l’agentivité (l’impression d’être l’auteur et le maître de ses propres actions). Ainsi, tout un réseau du contrôle et de la conscience de soi s’activerait, ce qui expliquerait que le rêveur lucide se rende soudain compte qu’il est en train de rêver et redevienne maître des opérations.

Pour autant, les données les plus récentes suggèrent que le cerveau lucide n’est pas dans un état hybride mélangeant veille et sommeil, mais juste dans un état de sommeil paradoxal un peu plus actif. L’hypothèse hybride était notamment soutenue par une expérience ayant mesuré des ondes gamma (des ondes de haute fréquence caractéristiques d’une activité mentale intense à l’éveil) dans le cortex préfrontal. Mais en 2022, une analyse a montré que ces ondes viennent en réalité de l’activité électrique des nerfs oculaires — les yeux bougeant beaucoup pendant le rêve lucide —, qui « contamine » le signal électroencéphalographique.

Une fois parvenu à prendre conscience que vous rêvez, vous aurez probablement besoin d’un peu de pratique pour exploiter toutes les potentialités du rêve lucide. *« Il faut souvent explorer un peu, afin de trouver sa propre méthode »*, explique Daniel Erlacher, de l’université de Berne, en Suisse. *« Pour voler, par exemple, les rêveurs lucides utilisent des techniques très diverses : certains décollent “à la Superman”, d’autres se servent d’un objet, à l’instar d’Aladin sur son tapis volant… Il est aussi utile de se répéter que l’on n’est pas dans un monde physique et que l’on peut faire ce que l’on veut, afin de s’en convaincre. »*

Voler est précisément l’activité préférée des rêveurs lucides, selon une enquête menée par ce même chercheur. La deuxième consiste à parler avec d’autres personnes, réelles ou imaginaires : l’un des sondés confie par exemple avoir échangé avec diverses célébrités, mais aussi avec un ours en peluche — qui s’est montré plus amical que les stars, note-t-il. En troisième position, le sexe complète le podium des activités privilégiées par nos explorateurs nocturnes. Rien que de très agréable, donc, et le plaisir est le premier bienfait recherché par les rêveurs lucides, qui se réveillent en général d’excellente humeur. Mais il en existe bien d’autres. Par exemple : s’entraîner à son sport de prédilection. Dans une enquête menée auprès d’environ 800 sportifs professionnels, plus de 5 % d’entre eux ont déclaré s’être déjà exercés lors d’un rêve lucide, avec l’impression de s’être améliorés dans les trois quarts des cas. *« Ne cherchez pas à travailler l’endurance ou la force, car vous ne produirez pas l’activité physio-* ▶

POUR EN SAVOIR PLUS

- **Le temps d’un rêve.** Cette exposition explore les songes sous toutes leurs formes, de l’Antiquité à nos jours. Musée des Confluences, à Lyon, jusqu’au 24 août 2025.
- ***La Science des rêves,*** Guillaume Jacquemont, Champs Flammarion, 2024.

MÉMOIRE

22 000 récits dans une banque de rêves

Rien de plus fugace qu’un rêve… Alors pour qu’ils ne nous filent pas entre les doigts, pourquoi ne pas les conserver dans un coffre-fort ? Deux chercheurs américains, William Domhoff et Adam Schneider, ont créé en 2000 une banque de rêves. Pas moins de 22 000 récits, principalement issus de journaux de rêves tenus par des individus sur de longues périodes, sont archivés sur un site consultable par le grand public. Mais cette banque de données est avant tout utilisée à des fins de recherche. Des études ont ainsi montré que l’anxiété et la peur peuplaient plus nos nuits que la joie ou le bonheur. Quant au sexe, il n’occupe que 2 % des rêves chez les hommes et 0,5 % chez les femmes. Autre idée reçue battue en brèche : la majorité des rêves ont une structure narrative relativement cohérente. D’autres révélations sont à venir grâce à la création d’un algorithme pour décrypter cette masse de rêves. **C. C.**

https://dreambank.net

EXPÉRIENCES

4 découvertes réalisées grâce au rêve lucide

Les rêveurs lucides ont ouvert une fenêtre inestimable sur le rêve, grâce à leur capacité à maîtriser les scénarios oniriques et à envoyer un « signal » vers l'extérieur — par exemple en bougeant les yeux d'une certaine façon sous leurs paupières fermées. Ce qui a permis une série de découvertes étonnantes.

1 On peut parler avec des rêveurs endormis

En 2021, plusieurs équipes ont réussi à établir une communication à double sens avec des rêveurs lucides endormis, grâce à des codes prédéfinis. Les chercheurs énonçaient par exemple une addition à voix haute et le participant assoupi répondait en effectuant un nombre adéquat d'allers-retours horizontaux avec les yeux (si l'opération était « 3 + 1 », il devait ainsi faire quatre allers-retours oculaires). La voix de la personne extérieure lui parvenait de diverses façons, émanant parfois d'un poste de radio onirique ou retentissant comme une « voix divine » sortie de nulle part. Deux ans plus tard, l'équipe de la neurologue Isabelle Arnulf a montré que le tracé électroencéphalographique se modifie de façon caractéristique dans ces phases où la communication est possible : *« Le cerveau semble ouvrir régulièrement des fenêtres de conscience sur le monde extérieur, comme s'il remontait un périscope depuis les profondeurs du sommeil »*, explique la spécialiste.

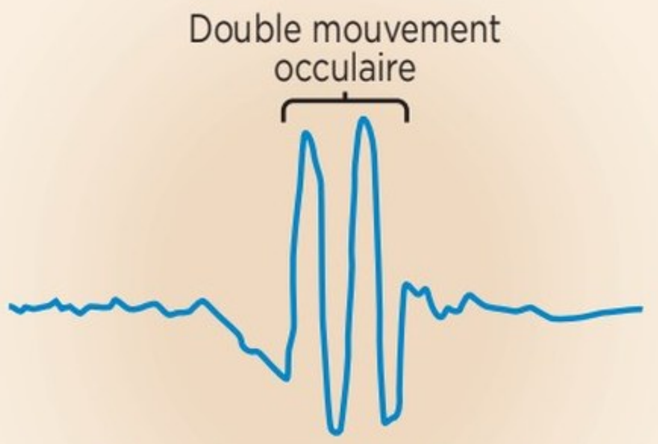
BRUNO BOURGEOIS

2 Le temps s'écoule de la même façon en rêve et dans la réalité

« Cinq minutes dans le monde réel vous donnent une heure de rêve », affirme un personnage du film *Inception*, de Christopher Nolan. Perdu : toute une série d'expériences ont montré qu'il n'y a aucune dilatation temporelle extravagante dans les rêves. Dans l'une d'elles, des rêveurs lucides devaient compter jusqu'à dix ou effectuer dix pas en songe, en signalant le début et la fin de cette tâche par un double aller-retour horizontal des yeux. Résultat : ces tâches leur ont pris quasiment le même temps que ce qu'on attendrait dans la réalité — soit environ dix secondes.

3 Nous « respirons » nos rêves

Si vous piquez un sprint en rêve, vous mettrez-vous à haleter dans votre sommeil ? C'est bien ce que suggère une expérience récente, où une vingtaine de rêveurs lucides ont imaginé des scénarios impliquant des vocalisations ou une apnée et se sont alors mis à respirer comme s'ils vivaient réellement ce dont ils rêvaient. Par exemple, une participante rêvant qu'elle nageait une brasse coulée a plusieurs fois enchaîné une inspiration profonde et une apnée. Une autre a bloqué sa respiration au cours d'un songe où elle s'était exposée à des vapeurs nocives dans le métro.



Pour communiquer avec les chercheurs et indiquer qu'ils ont pris conscience d'être en train de rêver, les rêveurs lucides utilisent souvent le même code : un double aller-retour horizontal des yeux, que l'on mesure grâce à un appareil nommé électro-oculographe. Deux pics bien distincts apparaissent alors sur le tracé.

4 Nous sommes connectés aux personnages de nos rêves

Les personnages qui peuplent nos rêves nous semblent indépendants, mais au fond, ils ne sont qu'une simulation de notre cerveau. Or ce dernier ne s'y perd pas totalement, comme l'ont montré deux études amusantes. Dans la première — aux résultats préliminaires, car très peu de participants ont réussi la tâche requise —, des rêveurs lucides devaient prier les personnages qu'ils croisaient de les chatouiller. Or ils n'y ont pas été plus sensibles que s'ils s'étaient chatouillés eux-mêmes. Dans la seconde, les rêveurs lucides devaient cacher leurs mains derrière leur dos et demander combien ils dressaient de doigts à leurs interlocuteurs oniriques. Ceux-ci sont tombés juste deux fois sur trois, là où le hasard leur laissait moins d'une chance sur dix… ■ **G. J.**

TECHNIQUES

Des thérapies contre les cauchemars

Vous vous réveillez en nage parce que vous n'êtes jamais parvenu à arriver à l'heure à ce rendez-vous très important. Cette incapacité à atteindre un objectif est le cauchemar le plus fréquent, selon une étude publiée en 2018. Bien que désagréables, les cauchemars ne doivent pas inquiéter, à moins qu'ils deviennent répétitifs. Dans ce cas, on parle de maladie du cauchemar. Environ 5 % de la population en souffre. Il est alors pertinent de recourir à un traitement car les cauchemars récurrents sont des facteurs de risque d'idées suicidaires ou encore de dépression. À ce jour, la thérapie par répétition d'imagerie mentale (IRT) est celle qui détient le plus haut niveau de preuves. Concrètement, il s'agit de réécrire le scénario d'un cauchemar dans sa version positive, pendant la journée. En plus de l'accompagnement par un thérapeute, plusieurs séances quotidiennes de visualisation positive d'une dizaine de minutes, pendant au moins deux semaines, réduisent la fréquence des cauchemars, notamment chez les personnes atteintes de stress post-traumatique. Et l'effet se maintient pendant plusieurs semaines voire plusieurs mois. Pour ceux qui ne répondent pas à ce traitement, une équipe de l'université de Genève (Suisse) a testé l'IRT associée à l'envoi de *stimuli* — souvent des odeurs ou des sons — lors de la visualisation et pendant le sommeil. L'étude parue dans *Current Biology* en 2022 a montré une diminution accrue de la fréquence des cauchemars et une augmentation des rêves positifs. D'autres techniques, telles que la thérapie par exposition systématique utilisée pour traiter les phobies, l'hypnose, ou encore l'EMDR (thérapie visant à traiter les traumatismes en utilisant des mouvements oculaires), ont moins fait la preuve, quant à elles, de leur efficacité contre les cauchemars. **C. C.**

▸ *logique correspondante : vos muscles ne se contracteront pas réellement,* précise toutefois Daniel Erlacher. *En revanche, pour toutes les disciplines requérant une certaine maîtrise technique, il y a un vrai potentiel.* »

De fait, la simple répétition mentale d'un geste aide à affiner sa précision. Et les rêves sont bien plus immersifs, sans compter que l'on se croit réellement en train de pratiquer. Une expérience publiée en 2017 confirme leur potentiel : les participants qui parvenaient à s'entraîner aux fléchettes pendant un rêve lucide voyaient leur score augmenter de 20 % le lendemain ! Un tel entraînement onirique n'a toutefois rien d'évident : outre la difficulté à atteindre le rêve lucide, certains participants ont été confrontés à des difficultés pour le moins inhabituelles à l'éveil, comme des fléchettes qui se transformaient en crayons ou des poupées qui leur lançaient des projectiles…

Les rêves lucides permettraient également de lutter contre les cauchemars, puisqu'en prenant le contrôle de son rêve, on peut en modifier les parties terrifiantes *(lire l'encadré ci-dessus)*. Pour le chercheur et psychologue allemand Paul Tholey, décédé en 1998, ils sont aussi une occasion de résoudre certaines difficultés sociales. Ce qu'il a illustré par une anecdote étonnante : une jeune fille qui participait à ses recherches, amoureuse d'un garçon dont l'attitude la déroutait, a « pris possession » de son corps pendant un rêve lucide. Elle voyait avec ses yeux, parlait avec sa voix, observait ses pensées… Ce qui lui procurait tout de même une sensation étrange : « *C'est le genre de sentiment que vous avez lorsque vous conduisez une Mercedes depuis des années, que vous connaissez parfaitement la voiture, puis que vous en changez soudainement pour une Austin Mini* », raconte-t-elle. Elle a alors compris que le garçon l'aimait beaucoup, mais pas au point de sortir avec elle, et a réussi à construire une relation amicale avec lui. Bien sûr, tout cela n'était qu'une simulation de son esprit, mais avouez que c'est autrement plus frappant que de simplement s'imaginer les pensées de l'autre !

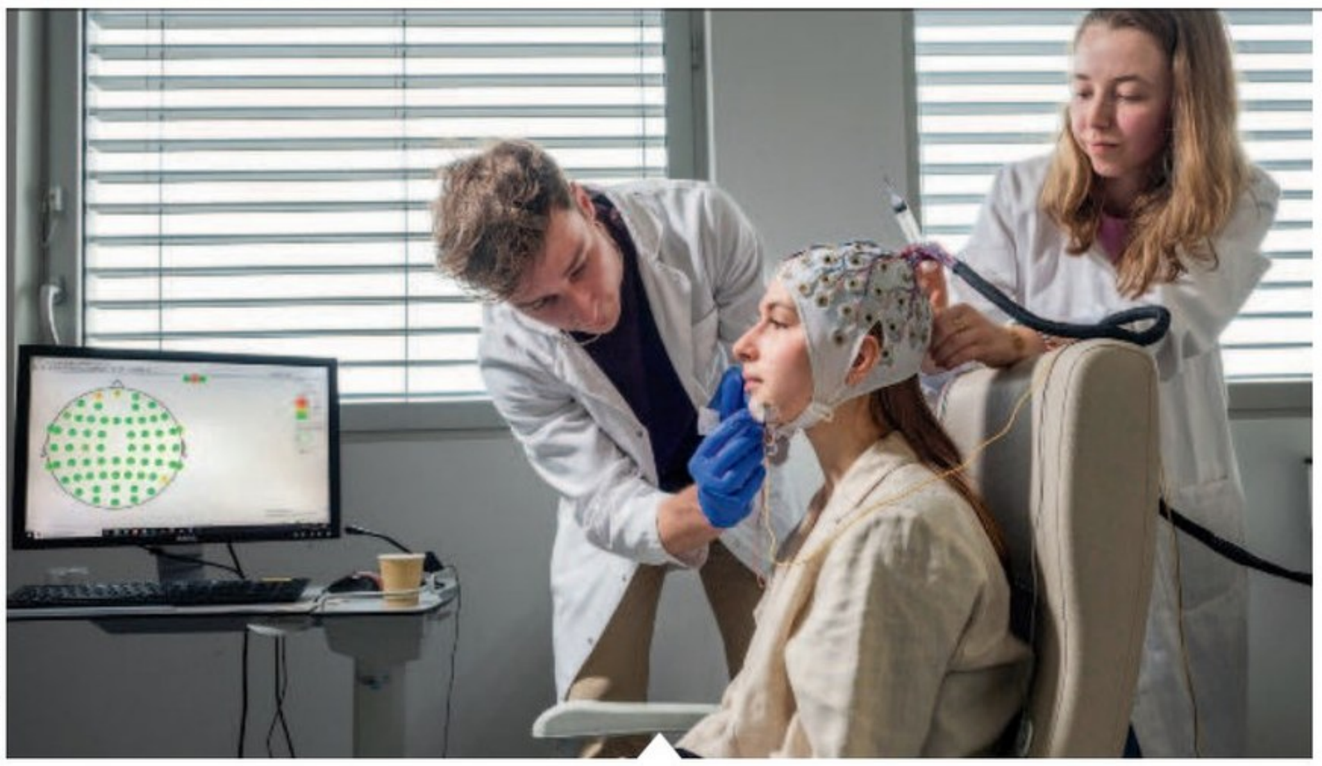
Rechercher un conseiller onirique pendant un rêve lucide

Dernier bienfait : la créativité *(lire p. 61)*. Il semble que ce soit un bénéfice plus général du rêve, qui est une forme de pensée hyperassociative propice à l'émergence d'idées nouvelles. En 2010, le chercheur lituanien Tadas Stumbrys a observé dans une petite étude que le rêve lucide permet d'optimiser ce potentiel créatif quand on parvient à demander conseil aux personnages rencontrés en songe. Si vous bloquez sur un problème scientifique, artistique ou personnel, n'hésitez donc pas à rechercher un conseiller onirique pendant un rêve lucide. Sachant qu'« *il ne suffit pas de penser* "Bruce Lee est là" *pour qu'il apparaisse dans vos rêves*, précise Daniel Erlacher. *Il est plus efficace d'aller faire un tour en vous disant que vous aimeriez bien le rencontrer.* » Et surtout, ne vous limitez pas : le chercheur américain Stephen LaBerge, pionnier de l'étude scientifique des rêves lucides, raconte l'histoire d'un informaticien qui allait prendre ses conseils auprès… d'Albert Einstein en personne ! ■ **G. J.**

Un potentiel créatif décuplé

Les scénarios improbables de nos rêves peuvent-ils nourrir la créativité ? Des expériences empiriques tendent à le prouver. Autre piste : exploiter la phase d'endormissement pourrait permettre d'ouvrir plus grand la boîte à idées.

« *Le dormeur assemble des images comme le poète assemble des mots.* » C'était la conviction de Marguerite Yourcenar. Pour exploiter la puissance créatrice des rêves, celle qui allait devenir la première femme académicienne s'était même astreinte, entre ses 28 et 33 ans, à se réveiller à l'aube pour capter ses rêves. La romancière est loin d'être la seule artiste à puiser son inspiration dans les songes. Paul McCartney a également déclaré qu'il s'est réveillé un matin avec la mélodie entière de *Yesterday* en tête. Mais la créativité n'est pas l'apanage des artistes. « *En neurosciences, elle se définit comme la capacité de produire quelque chose de nouveau et adapté à un contexte* », indique Delphine Oudiette, chercheuse à l'Institut du cerveau, à Paris. Autant dire que les scientifiques ont eux aussi essayé de tirer profit des rêves. L'inventeur Thomas Edison ou encore Albert Einstein sont connus pour avoir utilisé plus particulièrement les courtes phases de sommeil. Edison avait mis au point une tactique : il s'installait pour une sieste avec une boule en métal dans la main et quand celle-ci tombait bruyamment, il se réveillait et notait ses idées. « *En fait, l'idée selon laquelle le rêve est source d'inspiration est largement acceptée, mais nous manquons de preuves scientifiques sur le sujet,* témoigne Delphine Oudiette. *Seule une quarantaine d'études sont recensées dans la littérature.* » Et la majorité d'entre elles met en évidence des associations entre le sommeil paradoxal et la créativité. Parce que



FRANCOIS GUENET / DIVERGENCE

La mesure de l'activité électrique du cerveau aide à identifier les mécanismes de créativité avant et après les périodes d'endormissement.

HELEN GAO , MIT

Ce gant doté de capteurs du MIT (États-Unis) permettrait d'influencer les rêves de son porteur.

cette phase a longtemps été considérée — à tort — comme la seule période nocturne pendant laquelle nous rêvons et parce que nous manquons de marqueurs neurophysiologiques permettant de distinguer le rêve du sommeil. Sara Mednick, de l'université de Californie (États-Unis), a ainsi soumis des volontaires à des tests d'associations syntaxiques ou sémantiques. Il était demandé aux personnes de trouver un mot en lien avec trois autres préalablement donnés. Celles qui avaient fait une sieste incluant une phase de sommeil paradoxal obtenaient de bien meilleurs scores que celles qui avaient bénéficié d'une simple phase de repos. Autre démonstration apportée en 2013 par Ken Paller, neuroscientifique de l'université Northwestern (États-Unis) : des participants ont été exposés à des indices spécifiques (des sons) pendant qu'ils cherchaient à résoudre des casse-tête. Ensuite, alors qu'ils dormaient, ces mêmes sons étaient rejoués, sans qu'ils le sachent. Ces indices sonores ont ensuite nettement amélioré la résolution de cette tâche cognitive. En 2019, l'équipe de Delphine Oudiette a eu l'idée de se pencher sur les narcoleptiques qui, lors de leurs endormissements irrépressibles, entrent directement en phase de sommeil paradoxal. Soumis à des tests de créativité, les narcoleptiques ont obtenu des scores plus élevés que les sujets contrôles, faisant preuve de davantage de « pensées divergentes ». Un concept clé pour la créativité puisque c'est la capacité à générer un grand nombre de solutions originales à un problème donné. *« En fait, le sommeil paradoxal est un stade hyperassociatif où nous connectons des concepts très étranges entre eux »*, explique Delphine Oudiette. Des combinaisons qui peuvent se révéler très créatrices.

Exploiter la toute première phase de sommeil

Cependant, le sommeil paradoxal n'est pas le seul à doper notre inventivité. À la manière de Thomas Edison, la chercheuse de l'Inserm a souhaité investiguer les pouvoirs de la phase d'endormissement. Pour une étude parue en 2021 dans *Science Advances*, cette dernière a demandé à 103 volontaires de résoudre des problèmes mathématiques. Ceux qui n'avaient pas trouvé la règle cachée étaient invités à faire une sieste d'une vingtaine de minutes, un objet à la main. Résultat : passer au moins 15 secondes dans cette toute première phase de sommeil après l'endormissement triplait les chances de trouver cette règle cachée. Cet effet « Eurêka » disparaissait si les sujets plongeaient plus profondément dans le sommeil. Exploiter la phase d'endormissement pourrait alors permettre d'ouvrir plus grand la boîte à idées.

C'est le pari qu'a fait une équipe de chercheurs du Massachusetts Institute of Technology (Cambridge, États-Unis) en créant « Dormio ». Cette sorte de gant composé de capteurs surveillant l'activité physiologique — comme la fréquence cardiaque et les mouvements des muscles — pour détecter quand une personne entre en hypnagogie, cet état de transition entre l'éveil et le sommeil, émet des *stimuli* sonores. Ainsi, ils cherchent à influencer le contenu des rêves. Les premiers résultats parus en 2020 dans *Consciousness and Cognition* montrent qu'après avoir utilisé Dormio, les participants ont augmenté leurs capacités de pensée divergente et créative. En étant réveillés juste après l'état hypnagogique, ils étaient capables de générer des idées plus originales et variées par rapport à un groupe de contrôle.

Cependant, ces travaux sont fragiles car certains résultats n'ont pas pu être reproduits. Et les rêves ne constituent pas un ingrédient magique qui fera de vous un génie. *« Mon hypothèse, c'est que souvent la solution est déjà là, en nous, mais que le rêve la met en évidence sous une forme symbolique »*, avance Delphine Oudiette. ■ **C. C.**

KARINE FACON

« Le sommeil paradoxal est un stade hyperassociatif où nous connectons des concepts très étranges entre eux »

Delphine Oudiette, chercheuse à l'Institut du cerveau, à Paris

PERRINE RUBY
CHERCHEUSE INSERM AU CENTRE DE RECHERCHE EN NEUROSCIENCES DE LYON

« Les rêves jouent un rôle de régulation émotionnelle »

En rejouant des phénomènes intenses de la vie éveillée, le rêve permet d'évacuer les émotions s'y rapportant, de les mettre en scène en utilisant des métaphores ou encore d'instaurer du positif dans une expérience négative vécue.

Les rêves ont toujours intrigué, mais est-ce que la communauté scientifique s'intéresse de près à ce sujet ?
Les rêves intriguent depuis toujours mais il est vrai que la recherche académique est longtemps restée marginale. Des études expérimentales ont été menées au cours du XIXe siècle, mais il s'agissait d'initiatives individuelles. Sigmund Freud en a fait un sujet d'études mais la psychanalyse et la recherche expérimentale sont deux mondes qui ne se parlent pas… La découverte du sommeil paradoxal en 1959 a marqué un tournant. Des Américains ont alors fait une association entre cette phase et les rêves, et ce alors qu'aucune donnée ne le prouve. Le rêve se place en fait dans toutes les phases de sommeil. Pendant près de quatre-vingts ans, la recherche a donc été biaisée. Et nous n'en avons pas beaucoup appris sur les corrélats physiologiques des rêves. À partir des années 1990, la recherche a pris une nouvelle direction avec la démocratisation des outils de neuro-imagerie.

Les neurosciences nous ont-elles permis de savoir ce qui se passe dans le cerveau quand on rêve ?
C'est la question que tout le monde se pose mais c'est, à mon avis, loin d'être la plus pertinente. Prouver qu'on active le cortex visuel quand il y a des images dans le rêve revient à enfoncer des portes ouvertes. En outre, les neurosciences

P.RUBY

sont mises en échec car si on estime que nous rêvons uniquement pendant le sommeil paradoxal, il est alors possible d'enregistrer ce qui passe dans le cerveau ; il existe en effet des marqueurs physiologiques de cette phase. Mais, ce n'est pas pertinent puisque nous ne rêvons pas seulement pendant cette phase. Nous ne savons donc pas quand déclencher le scanner.

Que nous apprennent les récits de rêve ?
Il faut d'abord préciser qu'entre le rêve lui-même, son souvenir au réveil et le récit que nous en faisons, il y a des trous et des déformations. Nous sommes donc extrêmement loin de notre objet de recherche. Malgré tout, à partir de ces récits, on peut déjà essayer de répondre à bon nombre de questions. Et notamment comparer les expériences vécues la journée et celles pendant la nuit. En la matière, il a été bien démontré que notre vie éveillée a un gros impact sur le contenu de nos rêves. Et ce que l'on a observé, c'est que plus vous vivez des moments intenses émotionnellement dans la journée — positifs ou négatifs —, plus vous avez de chances d'en rêver.

La science nous permet-elle d'identifier la fonction des rêves ?
Si les humains d'aujourd'hui rêvent, c'est que le rêve a une dimension adaptative. Quand on constate que les rêves sont très émotionnels, qu'ils rejouent des événements intenses de la vie éveillée, nous sommes plusieurs à penser que le sommeil et le rêve jouent un rôle de régulation émotionnelle. Une fonction capitale pour la survie. Dans notre laboratoire, nous avons mené une expérience qui valide cette hypothèse. Nous avons demandé à des personnes de nous raconter leurs rêves pendant une semaine, de lister les événements réels qui y étaient incorporés et de noter l'intensité émotionnelle des versions éveillée et rêvée. Or cette dernière avait toujours une intensité diminuée par rapport à la version vécue.

Votre enquête pendant le confinement a-t-elle confirmé que les rêves ont une fonction de régulation émotionnelle ?
Ce travail a été passionnant. La perti-

nence des métaphores saute à la figure, avec beaucoup de références à la maladie, la mort, l'enfermement. Mais aussi beaucoup de récits mentionnaient des fêtes, des embrassades, des sorties entre amis. Ces désirs relationnels, les personnes les réalisaient en rêve. Cette enquête nous a également permis de formuler trois hypothèses concernant le mécanisme de régulation émotionnelle. Premièrement, vivre l'émotion en rêve permet de l'évacuer. C'est un phénomène cathartique. Le deuxième mécanisme, qui serait dominant, se nomme la transformation. Le rêve attrape un souvenir de la vie éveillée et met en scène l'émotion à l'aide d'une métaphore. Le contour symbolique essentiel se détache. Ainsi, nous prenons de la distance par rapport à l'émotion. Enfin, dernier mécanisme : la compensation. Le cerveau créerait du positif dans des situations d'expériences négatives aiguës pour contrebalancer. D'ailleurs, pendant le confinement, 7 % des personnes faisaient plus de rêves positifs que d'habitude.

Le rêve est un théâtre émotionnel qui constitue un merveilleux outil de connaissance de soi

Le fait de se souvenir de ses rêves modifie-t-il leur impact ?

Tout d'abord, on a longtemps cru, à tort, que c'était une question de mémoire. En fait, c'est la quantité d'éveils intrasommeil qui est déterminante, parce que pour garder une trace de ses rêves, on doit passer de la mémoire à court terme à la mémoire à long terme. Ce passage s'opère lors des phases d'éveil. En 2022, nous avons aussi mené une étude qui souligne des différences attentionnelles sur la fréquence des souvenirs. Ceux qui se souviennent souvent de leurs rêves ont tendance à davantage porter leur attention sur des événements inattendus de leur environnement, et donc à se réveiller plus fréquemment à la faveur de stimulations extérieures. Mais, la fonction régulatrice des rêves persiste même si on ne s'en souvient pas. Cependant, il est intéressant de les retravailler, puisqu'ils nous permettent d'identifier nos préoccupations émotionnelles importantes.

Chercher à contrôler ses rêves présente-t-il un intérêt ?

Les rêves ont un rôle fonctionnel, mieux vaut les laisser faire leur travail tranquillement. En outre, cela risque d'altérer le sommeil. Et pour travailler le contenu de ses rêves, l'idéal est de tenir un carnet dans lequel on écrit chaque matin. Progressivement, vous augmentez votre niveau de conscience et vous aurez plus de souvenirs. Ensuite, on peut se questionner sur ce qui paraît étonnant dans le récit. Le rêve est un théâtre émotionnel qui constitue un merveilleux outil de connaissance de soi. ■

Propos recueillis par C. C.

Une formidable diversité

11 fois par an, l'actualité des savoirs pour tous

Bon de commande

Je commande les numéros ci-après au prix de : 7 € par numéro payable par chèque à l'ordre de *Sciences et Avenir* (port compris pour la France).
Bon de commande à retourner à :

Sciences et Avenir
service des abonnements
45, av. du Général-Leclerc 60643 Chantilly Cedex

❑ N° 924 ❑ N° 925 ❑ N° 926 ❑ N° 927
❑ N° 928 ❑ N° 929/930 ❑ N° 931 ❑ N° 932

Nom : .....
Adresse : .....
..... Ville : .....
Code postal : .....

N° 924 Dépression : les nouvelles pistes pour s'en sortir

N° 925 Énergie noire : la force qui déchire l'Univers

N° 926 Nouveaux traitements pour vaincre l'insomnie

N° 927 Univers : la première seconde

N° 928 La France à +4 °C Ce qui va changer

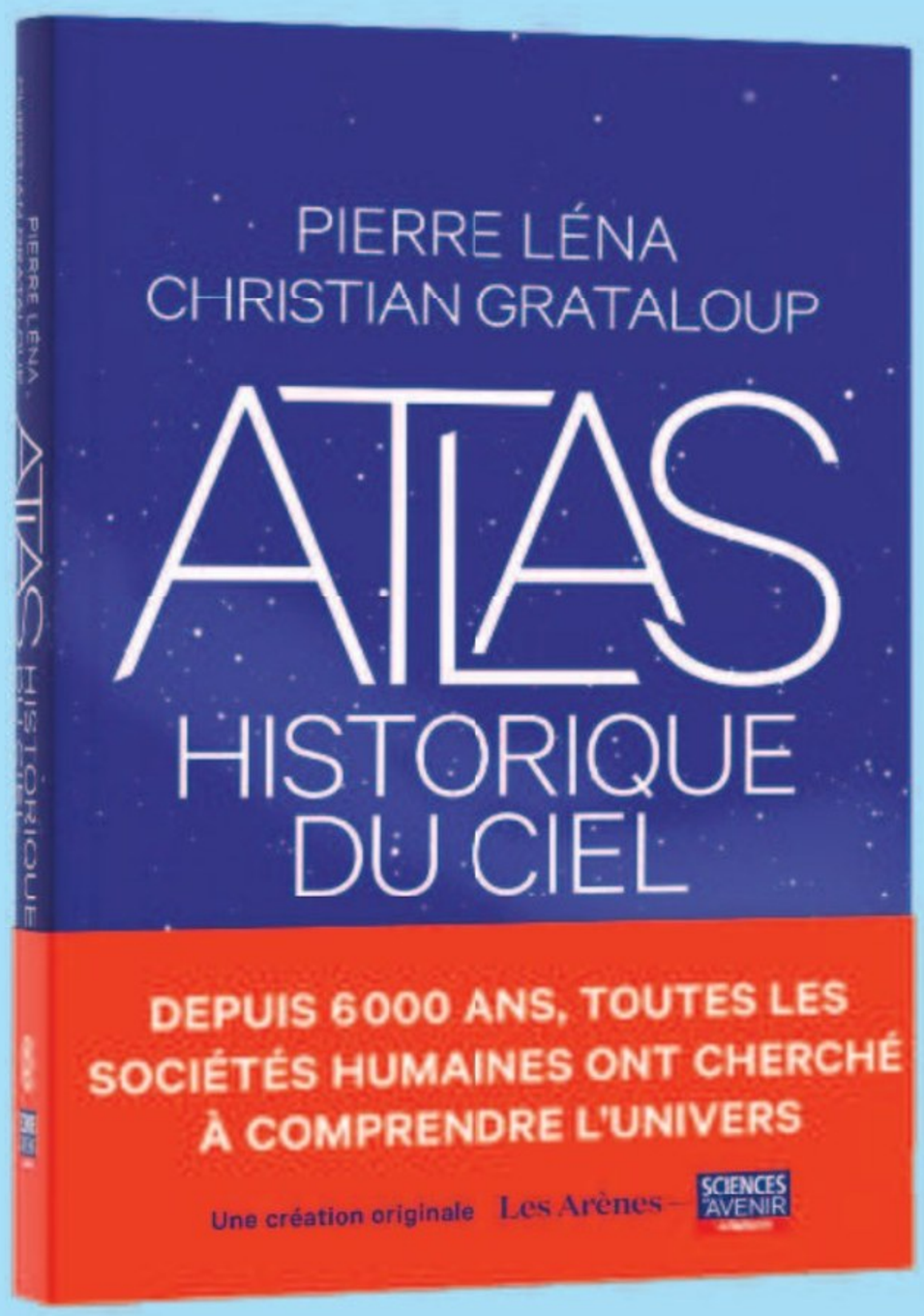
N° 929/930 20 questions qui obsèdent les scientifiques

N° 931 La molécule miracle

N° 932 L'ordinateur quantique arrive !

NOUVEAUTÉ
Sortie en librairie
le 3 octobre

Un atlas qui est autant un livre d'histoire qu'un livre de science



- **300 cartes et infographies inédites.**
  En s'appuyant sur une équipe d'historiens, de scientifiques et de cartographes de premier plan, Pierre Léna et Christian Grataloup réalisent un atlas accessible à tous, à la pointe de la recherche.
- **Un outil indispensable pour tout savoir sur le ciel et l'histoire de ceux qui ont cherché à le comprendre.**

250 pages - 27 €

Les Arènes

SCIENCES ET AVENIR La Recherche

Des illustrations et des schémas

Des ciels «historiques»
Ici, le ciel observé par Galilée depuis Padoue en 1609.

Des cartes inédites

Des infographies
Tableaux, graphiques et infographies pour rendre plus accessibles certaines données.

AVC

Agir vite pour le cerveau

La journée mondiale de lutte contre l'accident vasculaire cérébral (AVC), le 29 octobre, est l'occasion pour les spécialistes d'insister sur la nécessaire sensibilisation aux signes avant-coureurs. Afin d'éviter une prise en charge trop tardive et des séquelles lourdes. Car des traitements existent, d'autant plus bénéfiques qu'ils sont administrés tôt.

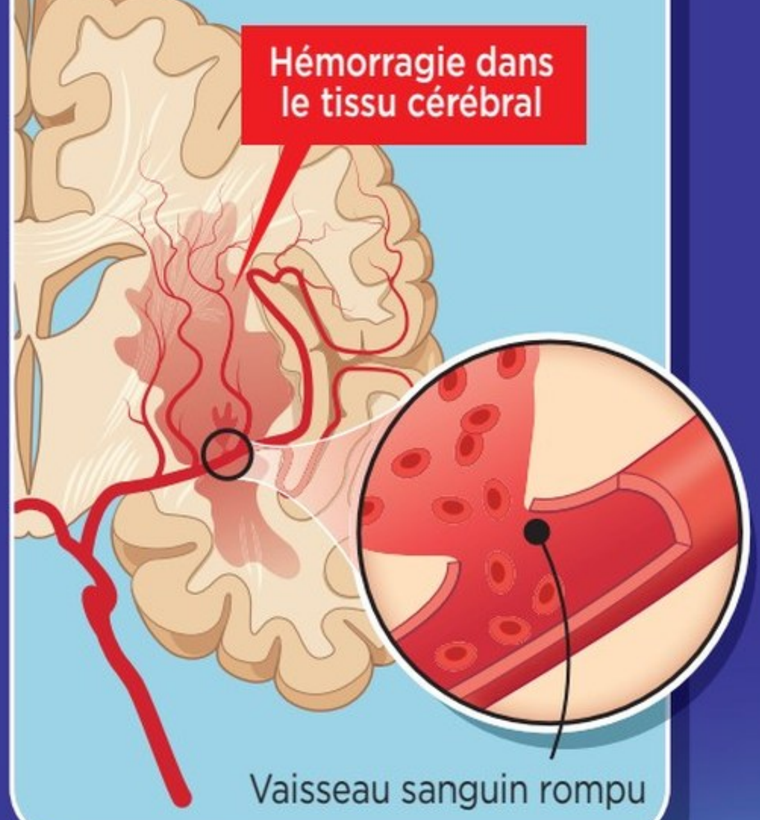
Par Sylvie Riou-Milliot

Trois lettres (AVC) pour évoquer l'accident vasculaire cérébral, un fléau de santé publique qui survient en France toutes les quatre minutes, soit 150 000 fois par an, provoquant 30 000 morts. À l'échelle de la planète, les chiffres sont accablants : 16 millions de nouveaux cas chaque année, plus de 5 millions de décès. De plus, si 60 % des patients récupèrent leur autonomie, 40 % en gardent des séquelles majeures (hémiplégie, hémiparésie, aphasie, *voir les définitions p. 68*) affectant leur quotidien. Sans oublier le handicap dit invisible, celui qui touche le comportement, la cognition, l'humeur. Plusieurs raisons expliquent ce lourd bilan. D'abord, la méconnaissance et le déni — tant par les patients que par leur entourage — des signes avant-coureurs (*lire p. 68*), qui conduisent à alerter trop tardivement. Ensuite, une pénurie de moyens et une inégalité d'accès aux structures de soins. Enfin, des mécanismes distincts dans les deux types d'AVC, ischémiques et hémorragiques *(voir l'infographie ci-contre)*, relevant pour chacun de traitements différents et que seule, à ce jour, l'imagerie réalisée en urgence (scanner, IRM) peut différencier.

Pour les AVC les plus fréquents (dits ischémiques, 80 % des cas), un caillot vient boucher une artère et le tissu cérébral qui n'est plus oxygéné meurt. ▶

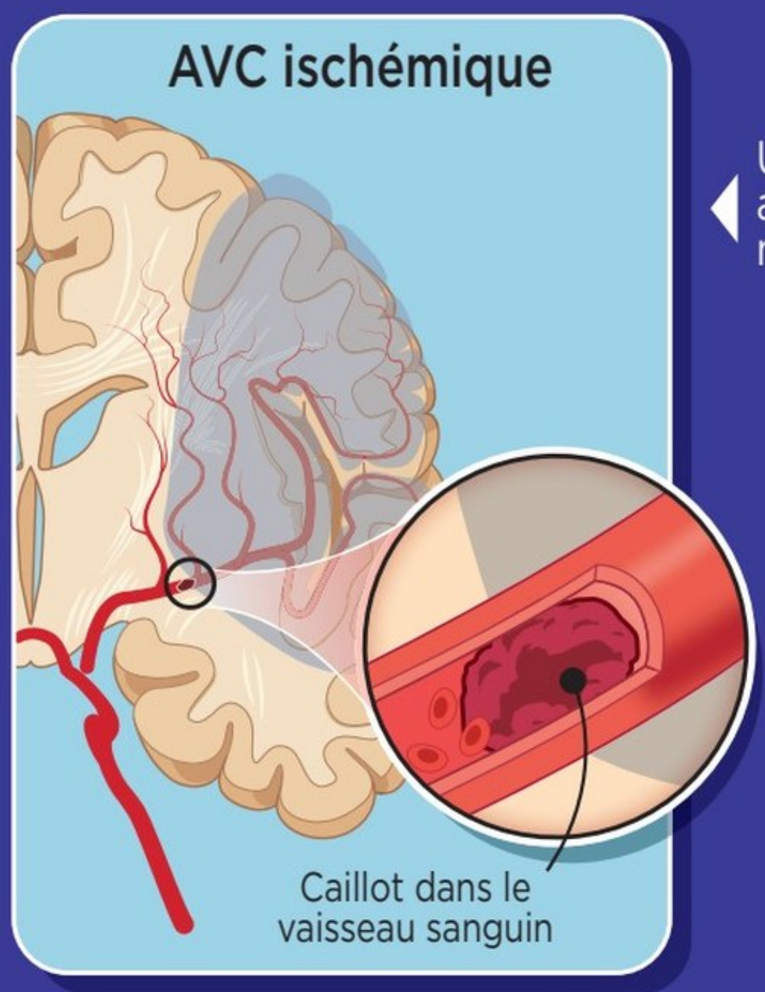
Deux types d'AVC

AVC hémorragique



Une artère se rompt et un hématome comprime alors le cerveau.

AVC ischémique



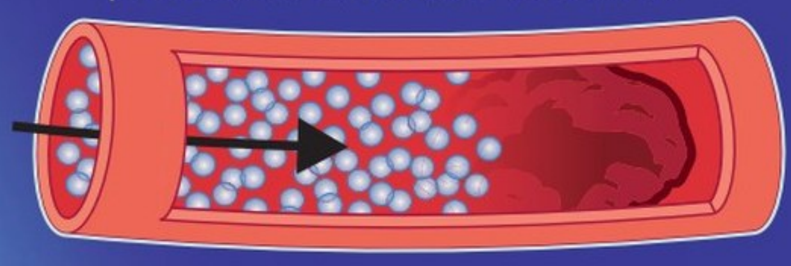
Un caillot vient boucher une artère et le tissu cérébral qui n'est plus oxygéné meurt.

2 millions
de neurones perdus toutes les 60 secondes en cas d'AVC aigus avant la prise en charge.

Deux traitements complémentaires en cas d'AVC ischémique

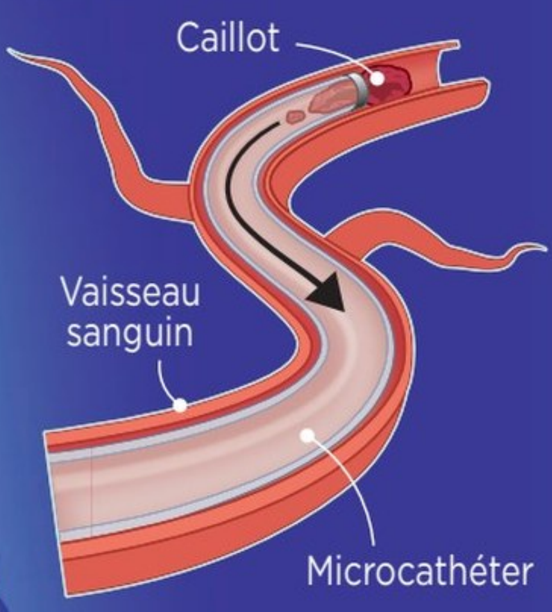
La thrombolyse

Une injection intraveineuse d'un produit va dissoudre le caillot.



La thrombectomie

Cet acte de neuroradiologie interventionnelle consiste à aller retirer le caillot avec l'aide d'un microcathéter.



BRUNO BOURGEOIS - SOURCE : FONDATION POUR LA RECHERCHE SUR LES AVC

150 000 cas par an en France

30 000 morts par an (deuxième cause de décès)

30 % des patients décèdent un an après un AVC

40 % des patients gardent des séquelles majeures

1re cause de handicap acquis

PATRICK ALLARD/REA

Aux urgences hospitalières, seule l'imagerie permet actuellement de distinguer le type d'AVC (hémorragique ou ischémique) et d'orienter en conséquence le malade vers le traitement approprié.

HÉMIPLÉGIE
Paralysie complète affectant la moitié gauche ou droite du corps. Elle peut concerner un bras, une jambe.

HÉMIPARÉSIE
Paralysie incomplète d'un membre, se traduisant par une faiblesse musculaire.

APHASIE Perte partielle ou complète de la capacité à s'exprimer ou à comprendre le langage écrit et parlé.

IDENTIFIER LES SYMPTÔMES

Faire (très) vite

Toujours indolores et d'installation brutale et rapide, les signes sont nombreux et variables d'un patient à l'autre. Pour les repérer, on peut utiliser l'acronyme VITE :

V comme visage déformé.
Affaissement d'un des coins de la bouche, asymétrie quand la personne sourit, parle. Mais V aussi comme baisse de vision brutale, vue double.

I comme impossibilité de bouger.
un membre (bras, jambe). La personne ne peut plus tendre les deux jambes, lever les deux bras devant elle, le membre atteint ne peut pas rester en hauteur et retombe. Mais aussi une simple faiblesse d'une zone du corps, avec fourmillements, engourdissements, perte d'équilibre.

T comme troubles de la parole.
Difficultés à parler, à comprendre, à répéter des mots.

E comme extrême urgence.
Composer le 15.

Pour les autres (dits hémorragiques, 20 %), une artère se rompt et un hématome comprime alors le cerveau. Dans ces cas, il n'existe malheureusement à ce jour pas encore de traitement spécifique disponible. Mais la situation devrait rapidement évoluer. Car pour la première fois, les résultats encourageants de deux études internationales, validant notamment l'évacuation chirurgicale de ces hémorragies, ont été présentés au 10e congrès de l'organisation européenne contre l'AVC (European Stroke Organisation Conference), qui s'est déroulé à Bâle (Suisse) au printemps dernier, et publiés depuis dans des revues de référence. De plus, un programme de recherche national, dont l'objectif est justement de transformer le pronostic de l'hémorragie cérébrale en identifiant de nouvelles cibles thérapeutiques, vient tout juste de démarrer à Lille *(lire p. 71)*.

Intervenir dans les six heures qui suivent l'attaque

Heureusement, face aux AVC les plus fréquents, les ischémiques, le traitement de référence est quant à lui bien codifié. Il repose souvent sur l'association de deux gestes *(voir l'infographie p. 67)* : d'une part, une thrombolyse (une injection intraveineuse d'un produit qui va dissoudre le caillot), combinée depuis près de dix ans à la thrombectomie, un geste dit de neuroradiologie interventionnelle consistant à aller retirer le caillot à l'aide d'un cathéter. Mais, pour être vraiment efficaces, tous deux doivent impérativement être réalisés le plus rapidement après le début des signes, au maximum dans les six heures, même si des essais en cours suggèrent qu'ils pourraient être administrés plus tardivement.

Car ici, chaque minute compte : le cerveau non oxygéné en raison du caillot qui bouche l'une de ses artères perd deux millions de neurones toutes les 60 secondes. D'où la formule des Anglo-Saxons « *time is brain* » (le temps, c'est du cerveau). Malheureusement, « *les symptômes de l'AVC, très variables d'un patient à l'autre, mais toujours d'installation brutale et totalement indolores, demeurent très mal connus et n'alertent pas assez vite* », résume le Pr Guillaume Turc, neurologue au GHU Paris Psychiatrie et neurosciences. Les patients arrivent encore trop tard, c'est-à-dire plus de six heures après l'AVC, dans les unités neuro-vasculaires (UNV), ces structures de prise en charge (au nombre de 140 en France) réparties sur l'ensemble du territoire. Partout ou presque… « *Il est probable*

que les prédictions des besoins en UNV, estimées à partir de registres urbains, aient été sous-évaluées », pointait en 2022 un rapport de l'Académie nationale de médecine. Résultat : encore trop de zones blanches le long de la « diagonale du vide » qui traverse l'Hexagone d'ouest en est. De plus, la montée en charge de l'activité des UNV, due à l'engouement pour la technique de la thrombectomie depuis 2015, ne s'est pas accompagnée de l'augmentation prévue des effectifs médicaux (neuroradiologues, neurologues, paramédicaux). Un décalage qui n'est pas sans gravité : quand les difficultés d'accès se cumulent avec la non-connaissance des signes d'alerte, c'est au final un patient sur deux seulement qui accède à une UNV, selon des chiffres datant de 2014.

En test, des unités mobiles pour accélérer la prise en charge

Et en 2024, « *rien n'a bougé,* déplore l'un des auteurs du rapport, le Pr Didier Leys, neurologue à Lille. *Nous sommes toujours confrontés au manque de personnel médical, infirmières et neurologues, surtout dans les petites structures.* » Avec ses coauteurs en 2022, Didier Leys avait d'ailleurs calculé que 5000 décès ou dépendances dus aux AVC étaient évitables. À condition de créer 75 nouveaux lits dans les structures UNV et de les répartir équitablement. Là encore, aucune modification depuis cette date. « *En l'absence de nouvelles études et en raison des difficultés de fonctionnement des UNV et de leurs fragilités qui se sont accrues avec le temps, cette situation ne s'est évidemment pas améliorée et s'est même sans doute aggravée* », déplore le spécialiste.

Au-delà de l'organisation des soins, une certitude : il faut faire au plus vite pour sauver le plus de neurones possible. Car plus l'AVC est pris en charge tôt et de manière adaptée, moins les séquelles seront importantes. « *Chaque minute gagnée dans l'administration de la thrombolyse correspond à deux jours supplémentaires de vie sans handicap, et à cinq jours dans le cas d'une thrombectomie* », martèle Guillaume Turc qui coordonne le projet Asphalt en cours en région parisienne. Cette étude unique teste, après l'Allemagne et les États-Unis, l'intérêt d'une UNV mobile. Soit une ambulance équipée d'un scanner qui, en se déplaçant sur le lieu même de l'accident, peut rapidement déterminer quel est le type d'AVC (hémorragique ou ischémique). Une fois le diagnostic posé et s'il s'agit d'un AVC ischémique, sans attendre l'arrivée du patient dans l'UNV où sera pratiquée la thrombectomie, il devient alors possible pendant le transport de réaliser la thrombolyse. Avant d'être déployée ▶

GUILLAUME TURC

« Les symptômes de l'AVC, d'installation brutale et indolores, demeurent très mal connus et n'alertent pas assez vite »

Guillaume Turc, neurologue au GHU Paris Psychiatrie et neurosciences

QUIZ

5 idées reçues sur les AVC

Ils ne concernent que les personnes âgées.

FAUX Si les plus de 65 ans sont les plus à risque, les adultes jeunes et aussi les enfants (500 à 1000 cas par an en France) sont également concernés. 10 % des AVC surviennent avant 50 ans et différentes études récentes rapportent que l'incidence des AVC augmente plus vite chez les moins de 55 ans et chez les femmes.

C'est la fatalité.

FAUX On peut modifier son mode de vie et ainsi agir en prévention. D'où l'importance du respect des dix conseils *(lire p. 73)*. Il est possible d'évaluer son propre risque avec l'application Riskometre : sciav.fr/933riskometre

Il faut toujours prévenir son médecin traitant.

FAUX Pour ne surtout pas perdre de temps, toujours composer le 15 afin de pouvoir accéder rapidement à l'imagerie, scanner ou IRM, la plus proche. Cela permettra de choisir le traitement en fonction du type d'AVC.

Il faut tout de suite prendre de l'aspirine.

FAUX Surtout chez les personnes âgées où les risques sont supérieurs aux avantages, et ce d'autant plus que l'AVC est hémorragique. Hier recommandée mais toujours débattue, la prise d'aspirine préventive ne fait à ce jour l'objet d'aucun consensus.

Aucun traitement n'est possible.

FAUX Les deux techniques que sont la thrombectomie et la thrombolyse augmentent les chances d'éviter des séquelles lourdes après un AVC ischémique. D'où l'urgence du 15 pour être orienté vers l'unité neurovasculaire la plus proche du lieu de survenue de l'AVC.

JEAN-MICHEL TURPIN/DIVERGENCE

Le chirurgien repère le caillot cérébral grâce à l'imagerie, en vue de pratiquer une thrombectomie, consistant à aller retirer le caillot à l'aide d'un cathéter (CHU de Nantes).

sur le territoire, Asphalt devra toutefois démontrer qu'après trois mois, le handicap des patients bénéficiant de cette prise en charge sera inférieur à celui observé avec une prise en charge classique. Premiers résultats attendus d'ici à 2027.

Dans cette phase cruciale, d'autres travaux envisagent de pouvoir un jour faire plus tôt la distinction entre les deux types d'AVC, non plus par l'imagerie comme cela est encore nécessaire aujourd'hui, mais par une simple prise de sang. Un graal pour les neurologues. Mais si certains biomarqueurs sont à l'étude, aucun n'a encore été validé à ce jour. Dommage, car « *cela permettrait de mieux trier les patients pour les orienter rapidement au bon endroit afin qu'ils reçoivent le bon traitement en fonction de leur type d'AVC* », souligne le Pr Mikaël Mazighi, neurologue (hôpital Lariboisière, Fondation Rothschild, Paris). Ainsi, un AVC hémorragique, qui ne relève pas d'une thrombectomie mais d'un service de chirurgie, n'aurait pas à être orienté vers une UNV sans service de chirurgie. C'est là l'un des objectifs du programme de recherche Booster (Brain clot personalized therapeutic strategies for stroke emergent reperfusion) coordonné par Mikaël Mazighi et lancé en 2019, qui vise « *le bon patient au bon endroit. Et pour faire émerger une médecine personnalisée de précision de l'AVC en situation d'urgence* », explique le neurologue. Avec, d'ici à 2026, le projet d'établir dès la prise en charge, dans le véhicule d'urgence, le profil type de l'AVC de chaque patient.

Car la vision des AVC est en pleine mutation. « *On les a longtemps pensés uniquement en termes de tuyaux à déboucher, bref de plomberie* », explique le Pr Jean-Marc Olivot, neurologue à l'hôpital Purpan, à Toulouse. Il travaille avec Mikaël Mazighi et coordonne également, avec le Pr Charlotte Cordonnier (CHU de Lille), StrokeLink, le réseau national de recherche portant sur l'AVC. Aujourd'hui, en raison des liens intimes existant entre thrombose, inflammation et immunité, de nouvelles perspectives de compréhension émergent. « *Des travaux encore très préliminaires utilisant l'intelligence artificielle couplée à de l'imagerie ont démontré qu'il existe différents profils de réponse immunitaire, présents dès les premiers jours et peut-être même dès les premières heures de l'AVC, qui pourraient influencer l'efficacité des traitements et être associés à des évolutions différentes* », poursuit le spécialiste.

Tous les caillots sanguins ne se ressemblent pas

En effet, là où les choses se compliquent encore, c'est que tous les caillots ne se ressemblent pas et n'ont pas le même profil d'évolution. Un caillot (dit aussi thrombus) est un complexe mélange de cellules sanguines (globules rouges, blancs, plaquettes) et aussi de fibrine, la principale protéine du sang contribuant à sa formation. Mais les travaux du programme Booster ont mis en évidence leur très grande hétérogénéité, certains résistant plus que d'autres aux molécules utilisées lors de la thrombolyse, des antiplaquettaires destinés à dissoudre au mieux le caillot. Et l'équipe a déjà identifié une cause : la présence de ▶

ACCIDENT ISCHÉMIQUE TRANSITOIRE

Ces signes qui peuvent annoncer un AVC

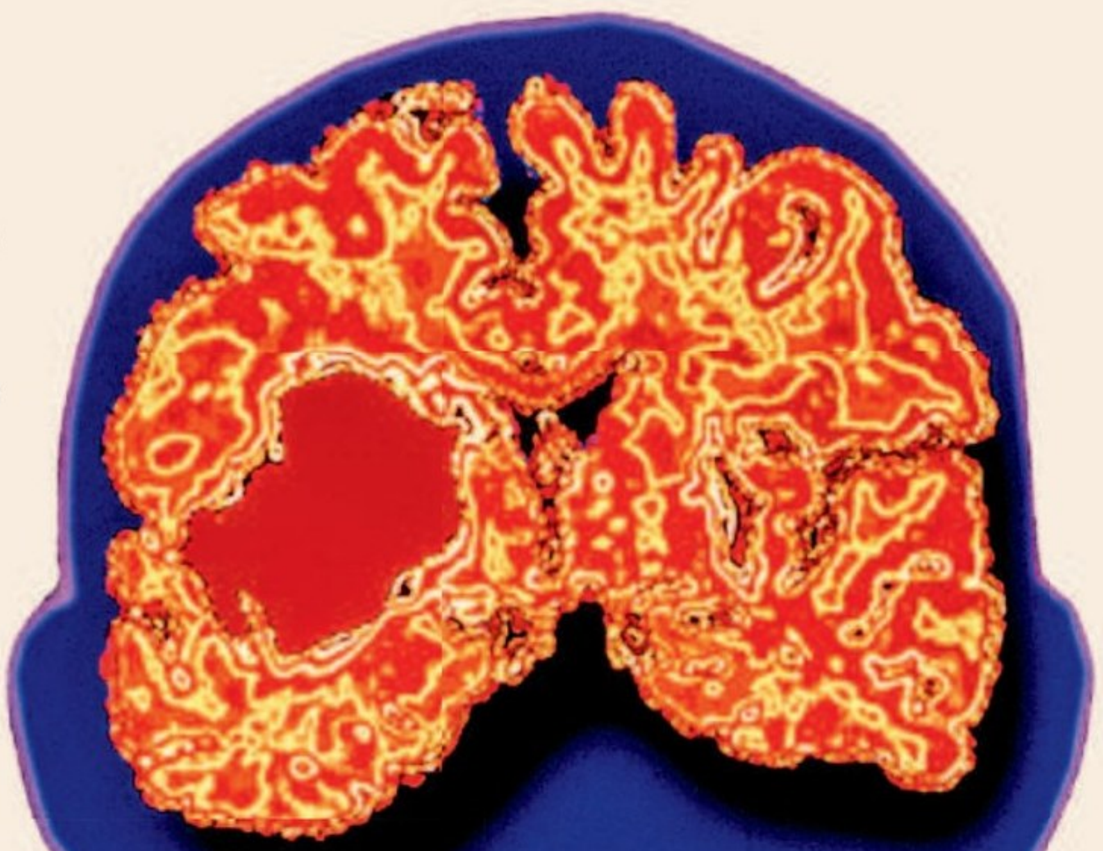
Si les signes avant-coureurs régressent spontanément en l'espace de quelques minutes à une heure, on parle d'AIT (accident ischémique transitoire). On les estime à 54 000 par an en France. « *Ce chiffre est sous-estimé, les patients trouvant cela drôle, bizarre, mais ne consultant pas* », regrette le Dr Denis Sablot, neurologue au centre hospitalier de Perpignan. Dommage. Car il s'agit souvent d'un signe annonciateur d'AVC qui, lui, se constituera dans les 24 à 48 prochaines heures. En France, il existe environ une quinzaine de structures, « cliniques de l'AIT », la première ayant été créée en 2003. L'enquête nationale coordonnée par Denis Sablot pour la Société française neuro-vasculaire (SFNV) a montré que la prise en charge de l'AIT était encore hétérogène, en raison de ressources et d'habitudes inégales parmi ces structures.

AVC HÉMORRAGIQUE

Juguler au plus tôt l'hématome

Si elle ne représente que 20 % des cas, l'hémorragie cérébrale est la forme la plus mortelle d'AVC. Elle intervient lorsqu'un vaisseau se rompt dans le cerveau et qu'un hématome se forme. Un programme de recherche prometteur lancé cet été à Lille entend renouveler l'approche thérapeutique en intervenant aux étapes clés de l'hémorragie. Explications.

Enfin un programme de recherche entièrement consacré à l'AVC hémorragique, celui pour lequel aujourd'hui un patient sur deux décède ou reste lourdement handicapé. Son nom, Tipitch (Transforming the prognosis of intracerebral haemorrage), traduit l'intention de l'équipe coordonnée par la Pr Charlotte Cordonnier, cheffe du service de neurologie et pathologie neurovasculaire au CHU de Lille : *« Notre ambition est bien de transformer d'ici à cinq ans le pronostic de l'hémorragie cérébrale en réduisant la mortalité et la sévérité du handicap d'environ 20 % »*, précise la spécialiste. D'où la création de ce groupe de recherche original associant des neurologues, des neuroradiologues, des hématologues, des chercheurs et deux partenaires industriels. *« En l'absence aujourd'hui de traitement spécifique, notre attitude face à l'AVC hémorragique est encore trop fataliste,* déplore Charlotte Cordonnier. *Or, des travaux menés ces dernières années ont permis d'identifier des cibles sur lesquelles il est possible d'agir. »* En effet, entre le moment où un vaisseau cérébral se rompt, que plusieurs dizaines de millilitres de sang se répandent et qu'un hématome se forme dans le cerveau, trois étapes clés ont été identifiées. Et c'est sur chacune d'entre elles que Tipitch développe des approches innovantes et complémentaires. D'abord, dans les premières heures, colmater la brèche. *« Nous aurons recours à un dispositif proche de celui utilisé lors de la thrombectomie, un cathéter de neuro-navigation mis au point en collaboration avec la société Balt, pour accéder à la brèche et stopper le saignement »*, détaille la neurologue. Pour la deuxième étape, il s'agit d'évacuer l'hématome au plus vite afin de minimiser sa compression sur le tissu cérébral. *« Nous développons avec l'un de nos partenaires, la start-up Op2Lysis, un outil spécifique »*, ajoute Charlotte Cordonnier. En pratique, cela consistera à aller « piéger » l'hématome. Car la substance utilisée, fluide avant l'injection, a la particularité de très vite se gélifier autour de l'hématome, l'ensemble pouvant ensuite être retiré mécaniquement par le cathéter. Enfin, dernière étape, réduire la réaction inflammatoire et l'œdème autour de l'hématome. *« Nous développons des médicaments dont la prise orale pourrait être envisagée dès 24 heures environ après le début des troubles »*, poursuit la neurologue. Tout juste lancé cet été, Tipitch bénéficie d'un soutien du programme France 2030 de près de 10 millions d'euros sur cinq ans.



L'hémorragie (à gauche en rouge, la zone de saignement) provoque une compression des tissus empêchant l'oxygénation du cerveau.

SCOTT CAMAZINE/BSIP

© BURGER/PHANIE

Après le diagnostic, ce patient atteint d'un AVC ischémique s'apprête à recevoir une thrombolyse, un traitement qui consiste à perfuser un médicament par voie veineuse pour dissoudre le caillot obstruant l'artère cérébrale (ici au CHU de Bordeaux).

réseaux extracellulaires d'ADN dits Nets (Neurophil extracellular traps) formant en périphérie une coque plus ou moins dure. Les chercheurs impliqués dans le projet souhaiteraient pouvoir les casser le plus rapidement possible en administrant au plus tôt un cocktail idéal de molécules en phase de test. À terme, le médecin pourrait alors choisir, selon les cas, entre une thrombolyse simple ou enrichie. On sait aussi aujourd'hui que les lésions cérébrales de certains patients appelés « fast progressors » (progresseurs rapides) s'aggravent plus vite que d'autres. D'où l'idée *« de parvenir à agir sur cette progression par l'administration de molécules spécifiques pour justement la ralentir »*, détaille Mikaël Mazighi.

Extension du domaine de la thrombectomie

En attendant que ces travaux bouleversent la pratique, *« la prise en charge des AVC est déjà en pleine évolution car le profil des patients se modifie*, note le Pr Sonia Alamowitch, de l'hôpital de la Pitié-Salpêtrière à Paris, qui préside également la Société française neurovasculaire. *On sait maintenant qu'il est possible de traiter en toute sécurité de plus en plus de personnes, même les plus âgées. On va aussi pouvoir intervenir plus tard, car les derniers essais en cours montrent que les fenêtres de traitement s'allongent régulièrement, jusqu'à neuf heures pour la thrombolyse et parfois même jusqu'à 24 heures pour la thrombectomie.* » La neurologue ajoute enfin qu'il sera également possible d'inclure des patients jusqu'à présent exclus des essais, comme ceux présentant des AVC étendus. En effet, depuis 2015, date de la validation de l'intérêt de la thrombectomie par de vastes études internationales, les spécialistes avaient tendance à ne la proposer qu'aux seuls patients chez qui la destruction du cerveau restait limitée. Un choix qui partait du principe que les plus sévèrement atteints ne tireraient pas bénéfice du geste de neurologie interventionnelle, leurs lésions étant considérées comme déjà trop importantes et affectant le pronostic.

Mais ce dogme est tombé à la suite des résultats d'une vaste étude internationale, In-Extremis Laste, coordonnée par le CHU de Montpellier. Présentée lors du congrès américain International Stroke Conference, en février, puis publiée au printemps dans la revue *New England Journal of Medicine,* elle prouve contre toute attente que *« le cerveau que l'on croyait mort ne l'est pas »*, réagissait l'un de ses auteurs, le Pr Vincent Costalat, au moment de la publication de l'étude. Avec le Dr Caroline Arquizan, il s'est intéressé à un groupe de patients sévèrement atteints. Les deux chercheurs ont donc démontré que pour ces patients aussi, la thrombectomie réalisée dans les sept premières heures était bénéfique, et ce quel que soit le volume de la zone nécrosée dans le cerveau. Pour preuve, deux avan-

tages de taille : une réduction de 20 % du risque de décès, et dans un cas sur cinq, la possibilité d'un retour à domicile. Un résultat inespéré qui *« concerne environ 7000 patients par an »*, précise Caroline Arquizan. À l'autre extrême, les spécialistes aimeraient maintenant savoir s'il faut traiter immédiatement par thrombectomie les patients présentant des signes qui paraissent mineurs ou s'il ne faut les traiter qu'en cas d'aggravation. Pour trancher et répondre à cette question, l'équipe montpelliéraine conduit l'étude Moste (Minor stroke treatment evolution). Pour cela, un partenariat avec les États-Unis et l'Espagne a été rendu possible grâce à un financement de près de 4 millions d'euros. *« 824 patients au total sont prévus, 606 sont inclus, dont près de 500 en France, 127 en Espagne et aux États-Unis. La fin de l'étude est prévue dans un an »*, détaille Caroline Arquizan.

Un nouveau médicament plus efficace pour la thrombolyse

Autre donnée, elle aussi en train de changer les pratiques pour gagner du temps dans les UNV, le recours à un nouveau médicament, le ténectéplase, pour réaliser la thrombolyse. Il présente non seulement l'avantage d'être beaucoup plus simple et rapide (une seule injection intraveineuse de quelques secondes) que le traitement de référence, l'altéplase, nécessitant, lui, la pose d'une perfusion en continu pendant 60 minutes, et d'être aussi plus efficace pour certains patients. Déjà courant dans les infarctus, son usage réglementaire est en train de se déployer face aux AVC. *« D'ici au début de 2025, la plupart des UNV devraient l'utiliser et cela va changer les pratiques »*, prédit Mikaël Mazighi.

Mais toutes ces avancées ne doivent surtout pas faire oublier un maître mot, la prévention. Car, bonne nouvelle, 80 % de l'ensemble des AVC sont évitables. En effet, tous sont déterminés par le mode de vie *(lire nos conseils ci-dessus)*. Et déjà, les spécialistes visent le champ de la prévention dite secondaire, celle qui consiste à éviter la survenue d'un second AVC, c'est-à-dire réduire les récidives car le risque demeure élevé, près de 13 % à cinq ans. Pour cela, deux types d'approche. D'une part, ceux qui veulent démontrer, comme cela a déjà été fait dans l'infarctus du myocarde, l'utilité de la prise d'anti-inflammatoires comme la colchicine. Plusieurs essais sont en cours dans le monde dont un en France, coordonné par le Pr Pierre Amarenco, (hôpital Bichat, Paris), très impliqué dans la lutte contre l'AVC, à l'origine il y a vingt ans de la première clinique pour les accidents ischémiques transitoires (AIT, *lire l'encadré p. 70*). Les résultats de l'essai français ne sont pas attendus avant 2027. D'autre part, ceux qui cherchent à identifier dans le sang des biomarqueurs du risque de récidive par une simple prise de sang. Plusieurs travaux publiés au cours de ces derniers mois ont identifié certaines pistes. Autant de recherches dont les résultats seront suivis de très près. Car, c'est une certitude, d'ici à 2050, le nombre de patients va fortement augmenter. Selon une étude parue fin 2023 dans la revue *Lancet Neurology*, d'ici à vingt-cinq ans le nombre de décès liés aux AVC sera multiplié par deux et atteindra 10 millions par an. Raison de plus pour miser sur la prévention. ■

SONIA ALAMOWITCH

« On sait maintenant qu'il est possible de traiter en toute sécurité de plus en plus de personnes, même les plus âgées »

Sonia Alamowitch, neurologue à l'hôpital de la Pitié-Salpêtrière à Paris

PRÉVENTION

10 conseils pour réduire le risque d'AVC

1. **Contrôler son hypertension artérielle (HTA). C'est le principal facteur de risque. Or, 50 % des hypertendus s'ignorent. Pourtant, chaque diminution de 10 mmHg du premier des deux chiffres de tension artérielle par des médicaments antihypertenseurs permet de réduire le risque de 20 %.**
2. **Éviter de fumer. La consommation de cigarettes multiplie par deux le risque.**
3. **Perdre du poids en cas de surpoids et d'obésité abdominale.**
4. **Pratiquer régulièrement une activité physique (au moins 30 minutes par jour).**
5. **Suivre une alimentation équilibrée (plus de fruits et de légumes, moins de sel et de sucre).**
6. **Limiter la consommation d'alcool.**
7. **Prendre son pouls pour détecter un trouble du rythme cardiaque responsable d'un AVC sur cinq : la fibrillation cardiaque. Des battements irréguliers doivent faire consulter. Et prendre régulièrement le traitement anticoagulant si celui-ci est prescrit.**
8. **Réduire son stress.**
9. **Contrôler son diabète (glycémie).**
10. **Surveiller son bilan lipidique sanguin (taux de cholestérol, triglycérides).**

6 pistes de rééducation après un AVC

Les spécialistes en sont convaincus : il n'est jamais trop tard pour rééduquer un cerveau lésé et tenter de pallier les déficits cognitifs. Exemples avec ces programmes de recherche très prometteurs.

Près de 500 000 personnes vivent aujourd'hui en France avec des séquelles d'AVC visibles ou invisibles. Si les mécanismes de récupération spontanée du cerveau, en lien avec sa plasticité, se mettent en place jusqu'à un an environ après l'AVC, ils ne sont malheureusement pas toujours suffisants pour permettre une récupération complète. Ils doivent donc être renforcés par un temps de rééducation passé dans les structures de Médecine physique de réadaptation (MPR), des lieux spécialisés fonctionnant de manière pluridisciplinaire (kinésithérapeutes, orthophonistes, neuropsychologues, ergothérapeutes). Plus cette prise en charge globale s'effectue de manière précoce et intensive, meilleur sera à terme le résultat. « *Mais tous les patients relevant de cette prise en charge n'ont pas toujours accès aux MPR* », pointe le Pr Isabelle Bonan à Rennes. Et ce, en raison d'un retour trop rapide au domicile, d'un passage prolongé en gériatrie… Pourtant, les spécialistes sont unanimes : il n'est jamais trop tard pour rééduquer un cerveau et pallier les déficits cognitifs. D'où la nécessité de développer des stratégies novatrices accessibles au plus grand nombre et permettant d'alléger le quotidien.

ANDREW BRODHEAD, STANFORD LABS

Les vibrations mécaniques émises par le gant soulagent les spasmes musculaires ressentis au niveau des mains.

Porter un casque électromagnétique

Recourir tôt à des champs électromagnétiques de faible intensité grâce à un casque portable pour aider à réduire le handicap post-AVC : c'est la piste suivie par la start-up américano-israélienne Brain.Q. En mai, lors du 10e congrès européen consacré à l'AVC (European stroke organisation conference), le Dr Jeffrey Saver, neurologue à l'université de Californie à Los Angeles (États-Unis) et coordonnateur de l'essai Emagine de l'entreprise, a présenté les premiers résultats estimés prometteurs. Cet essai est mené dans une quinzaine de centres universitaires états-uniens auprès d'une centaine de patients, en association avec la rééducation classique. Commencé dans les premières semaines suivant un AVC, il est poursuivi à domicile environ deux mois. L'administration non invasive d'un champ électromagnétique de faible intensité (moins de 100 hertz) sur l'ensemble de la surface du crâne est effectuée par l'intermédiaire du dispositif portable 40 minutes par jour, cinq jours par semaine, pendant huit semaines. Pour Jeffrey Saver, « *les premiers résultats laissent entrevoir une meilleure réduction du handicap dans le groupe traité* ». L'essai doit se poursuivre et faire l'objet d'une publication. Quant à la start-up, forte du feu vert américain obtenu en 2021, elle vise déjà le marché européen.

Un gant vibrant pour réduire les spasmes musculaires

Des chercheurs de l'université Stanford (États-Unis) ont mis au point un dispositif portable, actuellement en phase de test au domicile et lors d'ac-

BRAINQ

Un champ électromagnétique de faible intensité, délivré sur l'ensemble de la surface du crâne par un casque portable, vise à améliorer la récupération et à réduire l'invalidité.

G.LIOIET AL

Équipé d'un casque EEG et placé dans l'IRM, le patient visualise sur un écran ce qui se passe dans son cerveau au moment où il réalise un exercice de motricité. Il peut ensuite adapter son effort pour un meilleur résultat.

tivités quotidiennes (3 heures par jour pendant huit semaines), qui fournit une stimulation vibrotactile à la main et aux doigts. Ce gant vibrant pourrait faciliter la rééducation du membre supérieur et réduire les spasmes musculaires souvent ressentis par les patients victimes d'AVC.

Les promesses du neurofeedback

C'est une technique d'entraînement qui utilise en temps réel l'activité cérébrale du patient pour l'aider à retrouver plus vite une meilleure motricité. Positionné dans l'IRM, il peut voir sur un écran ce qui se passe dans son cerveau au moment même où il réalise l'exercice. Cette information visuelle lui permet d'adapter son comportement et de renforcer son travail.

Après une étude exploratoire menée sur quatre patients en 2020, les chercheurs pionniers de l'unité Empenn (CNRS, Inserm, Inria, université de Rennes) ont associé l'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf) à l'électroencéphalographie (EEG), cette fois chez 20 personnes atteintes d'un AVC datant d'au moins six mois et présentant toutes une hémiparésie du bras. Ils les ont comparées à 20 autres patients bénéficiant d'une rééducation classique. « *Nos résultats sont un succès pour certains patients répondeurs qui ont ainsi mieux récupéré* », rapporte Isabelle Bonan, coordonnatrice de ces travaux en cours de publication. L'entraînement régulier au cours des différentes séances d'une durée de 1 h 15, trois fois par semaine, avec ou sans IRM pour faciliter son usage à plus grande échelle, semble donc prometteur. La prochaine étape, déjà en cours, consiste à utiliser la technique du neurofeedback sur des AVC cette fois très récents (datant de moins de trois semaines).

Mieux rééduquer l'aphasie

Les séquelles du langage (compréhension ou production de la parole) concernent environ 50 000 personnes par an en France. Autant de difficultés de communication qui peuvent entraîner un repli social, une dépression. Comment améliorer la prise en charge des patients quand l'évaluation classique par un orthophoniste, longue et fastidieuse (environ trois heures), doit s'effectuer dans un contexte de pénurie de spécialistes ? Un outil numérique, eCalap-AVC (Core assessment of language processing), se propose de « *repérer en quinze minutes les lésions du langage sur lesquelles on peut ensuite mieux* ▶

cibler la rééducation », détaille Charlotte Jacquemot, directrice du département d'études cognitives de l'École normale supérieure, à Paris. Elle travaille avec son équipe sur cet outil depuis près de deux décennies. Une application gratuite en développement (une version pour les professionnels, une autre à destination des patients) devrait voir le jour d'ici à un an.

Les espoirs de la thérapie cellulaire

Tout juste démarré en septembre, un essai de thérapie cellulaire, Resstore, est en cours à Grenoble. « *Il s'agit d'injecter par voie veineuse des cellules souches mésenchymateuses* [cellules capables de se multiplier] *provenant de tissus adipeux de donneurs par liposuccion* », précise son coordonnateur, le Pr Olivier Detante, neurologue à l'unité neurovasculaire du CHU de Grenoble, qui travaille depuis plus de dix ans sur cette approche. Six patients sur 40 ont déjà été inclus et le suivi de leur récupération motrice s'effectuera jusqu'en 2026 en comparaison de celle de 40 autres patients du groupe placebo. En Europe et aux États-Unis, d'autres essais ayant recours à des cellules différentes (embryonnaires) administrées par d'autres voies (en intracérébral) sont également à l'étude.

Stimuler le nerf vague

Réactiver le cerveau après un AVC pour réduire le handicap grâce à la stimulation du nerf vague (SNV) — ce nerf reliant le cerveau à l'ensemble de notre corps *(lire* S. et A. *n° 855)* —, tel est l'objectif de nombreux essais en cours très encourageants. Si cette approche a débuté il y a plus de vingt ans par des tests chez les rongeurs, une nette accélération s'est produite en avril 2021, avec la publication dans *The Lancet* d'un travail états-unien mené auprès d'une centaine de patients, dont la moitié ont vu leurs fonctions motrices s'améliorer. Même si l'on ne comprend pas encore pourquoi certains patients répondent et d'autres non, ce résultat a rapidement convaincu la FDA, l'agence américaine du médicament, de donner, après l'épilepsie résistante et la dépression, le feu vert à cette nouvelle indication, l'AVC ischémique. « *De manière surprenante, l'envoi d'impulsions électriques non douloureuses* via *ce nerf crânien, facile d'accès, peut en effet amplifier la récupération fonctionnelle des patients sans générer d'effets secondaires* », indique Julien Chuquet, neurobiologiste dans le Groupe de recherche sur le handicap ventilatoire et neurologique, à Rouen. Il espère sous peu se lancer lui aussi dans la course à la neuromodulation, lorsque les autorisations seront données. « *En dehors de la rééducation physique, il n'existe toujours pas, en 2024, de traitement efficace et standardisé pour amplifier la reconstruction des circuits cérébraux détruits* », rappelle le chercheur. D'où l'enjeu majeur de poursuivre ces nouvelles stratégies dites neuroréparatrices. Elles agissent soit après une chirurgie (implantation du stimulateur autour du nerf, Vivistim), soit de manière non invasive mais par simple application au niveau de l'oreille (Nemos), une stimulation transcutanée des branches terminales du nerf. Reste à savoir s'il faut coupler la stimulation du nerf à l'exécution d'un mouvement. « *La SNV demeure empirique, chaque équipe utilisant son propre protocole,* prévient le scientifique. *D'où la nécessité de mieux comprendre les mécanismes d'action à l'œuvre dans la reconstruction des circuits neuronaux pour enfin trouver un consensus.* » Et son équipe de travailler sur l'hypothèse suivante : démontrer que la stimulation du nerf vague normalise l'excitabilité du cortex lésé. ■

OHIO STATE UNIVERSITY WEXNER MEDICAL CENTER

Implanté sous la peau au niveau du nerf vague, le dispositif Vivistim permet d'améliorer les fonctions motrices des membres supérieurs en complément de la rééducation.

POUR EN SAVOIR PLUS

Journée mondiale de l'AVC le 29 octobre

Le site de l'association France AVC (informations, prévention, témoignages)
www.franceavc.com

DANS Les Echos DEPUIS 2010

L'ère de l'intelligence artificielle commence

TECH Quel sera le moteur de la croissance économique mondiale de la nouvelle décennie ? Il faut parier que les années 2010 seront celles où l'intelligence artificielle commencera à avoir un impact économique aussi important que l'émergence de l'Inde et de la Chine.

En 1996 et 1997, le champion mondial d'échecs, Gary Kasparov, a joué deux matchs contre un ordinateur. En 1996, le Deep Blue d'IBM a étonné le champion en gagnant la première partie. Mais Kasparov a rapidement adapté son jeu dans une stratégie à long terme, par laquelle son jugement et son intuition semblaient tromper le fonctionnement mécanique de l'ordinateur.

Malheureusement, le bien trop confiant Kasparov n'a pas su prendre Deep Blue suffisamment au sérieux lors de la rencontre de 1997. Deep Blue a traumatisé le champion en gagnant le match. De nombreux commentateurs avaient alors qualifié le triomphe de Deep Blue comme étant l'un des événements les plus importants du XXe siècle. Au cours des années qui ont suivi, même si les hommes ont beaucoup appris des ordinateurs, ces derniers ont toujours progressé à un rythme beaucoup plus rapide.

Les programmes d'ordinateur ont commencé à exploiter d'énormes bases de données de parties entre les Grands Maîtres (la plus haute distinction aux échecs). Il devint rapidement évident que même les meilleurs joueurs d'échecs humains auraient peu de chances de faire mieux qu'une partie nulle.

Aujourd'hui, les programmes de jeux d'échecs sont devenus si bons que même les Grands Maîtres ont parfois du mal à comprendre la logique derrière certains de leurs coups.

Pis encore, de nombreux logiciels disponibles sur le marché peuvent être programmés pour imiter le style des meilleurs Grands Maîtres à un point qui en est presque troublant. Ces programmes électroniques sont maintenant presque capables de passer le test d'intelligence artificielle du mathématicien britannique Alan Turing : un homme conversant avec une machine peut-il affirmer qu'elle n'est pas humaine ?

Je ne le peux pas, en tout cas. Ironiquement, alors que les triches électroniques commencent à se répandre dans les tournois d'échecs, l'outil de détection principal requiert l'utilisation d'un autre ordinateur. Seule une machine peut dire de manière constante le coup qui sera joué par un autre ordinateur. Si Turing était encore vivant, il définirait peut-être l'intelligence artificielle comme l'incapacité d'un ordinateur à dire si une autre machine est humaine !

Tout cela a-t-il mis les joueurs d'échecs au chômage ? La réponse, encourageante, est : « pas encore ». L'homme et la machine ont appris à coexister, du moins pour l'instant.

Bien sûr ceci n'est qu'un tout petit aperçu des changements plus importants auxquels nous pouvons nous attendre. Imaginez, un jour, nous pourrions même préférer des opérateurs digitaux aux humains.

Dans cinquante ans, les ordinateurs pourraient tout faire, conduire un taxi ou réaliser des opérations chirurgicales. Mais avant cela, les cursus d'études supérieures auront été transformés par l'intelligence artificielle, créant ainsi potentiellement une université mondiale largement accessible, même aux pays en développement les plus pauvres. Il y a, bien sûr, beaucoup d'autres utilisations plus terre à terre, mais cruciales, de l'intelligence artificielle, depuis la domotique jusqu'à la généralisation des « réseaux intelligents » pour la gestion et la distribution de l'eau et de l'électricité, qui permettront de diminuer le gaspillage par un meilleur contrôle.

En résumé, je ne partage pas l'avis de certains, assez nombreux, qui pensent qu'après l'Internet et l'ordinateur portable, il faudra attendre longtemps avant la prochaine innovation révolutionnaire. L'intelligence artificielle insufflera l'énergie nécessaire à la relance. On évitera un autre cycle de profondes crises financières qu'à la condition que les politiques ne se mêlent pas des nouveaux modèles de commerce, de technologie et d'intelligence artificielle. ■

RCS Paris 582 071 437 – © Getty Images / AdobeStock – HAVAS Paris

Les Echos
Prenez un temps d'avance

La pomme de terre sous toutes ses formes

Ce tubercule se rapproche des légumes par sa richesse en eau et son faible apport calorique. Il cumule les atouts, mais la façon de le cuisiner peut augmenter son indice glycémique.

Pot-au-feu, raclette, gratin, frites… La pomme de terre est l'ingrédient incontournable de nombreuses recettes de saison. Bien que sa consommation ait baissé au fil des années (47,6 kg par habitant en 2021-2022, contre 74 kg en 1980-1981) (1), 63 % des Français la cuisinent encore au moins une fois par semaine (2). Avec raison, car cet aliment, parfois éliminé à tort de certains régimes alimentaires, ne manque pas d'atouts nutritionnels, à condition de ne pas abuser de ses formes frites ou chips, les plus riches en graisses.

6,4 millions de tonnes de pommes de terre destinées à la consommation ont été produites en France en 2022, dont 882 000 tonnes sont réservées aux surgelés. (SOURCE AGRESTE)

Une centaine de variétés cultivées

La pomme de terre précoce (ou primeur, nouvelle) cultivée en France dans les régions à hiver doux (littoral atlantique, Bretagne) est récoltée au printemps, souvent avant d'avoir atteint sa maturité. Celle de conservation, ou tardive, plantée en avril-mai un peu partout en France, se récolte, elle, en été. On distingue celle à chair farineuse (bintje, vitelotte) adaptée à la préparation des purées et des frites, à chair ferme (amandine, belle de Fontenay, roseval, charlotte) à consommer rissolées, en salade ou à la vapeur, et, enfin, celles à chair tendre ou fondante (agata, monalisa, etc.), pour une cuisson au four. À noter que la patate douce *(Ipomea batatas)*, tubercule orangé originaire d'Amérique centrale, n'appartient pas à la même famille que la pomme de terre, les **solanacées** *(Solanum tuberosum)*.

Un légume-féculent

Si ce tubercule se rapproche des légumes par sa richesse en eau (80 % en moyenne) et son faible apport calorique (environ 90 kcal/100 g cuite au four ou à l'eau) — excepté consommée en frites (285 kcal/100 g) ou en chips (545 kcal/100 g) —, l'Organisation mondiale de la santé (OMS) la classe parmi les féculents, en raison de sa teneur élevée en glucides (15 à 20 %). Il s'agit principalement d'amidon (amylose) dont une fraction, changeant selon les variétés et le mode de cuisson, est de l'**amidon résistant**. Les pommes de terre bouillies (bintje) en renferment environ 2 %, les pommes de terre frites 5 % et la salade froide de pommes de terre, 6 % (3). Non digéré, l'amidon résistant est fermenté dans le côlon par les bactéries intestinales, produisant des acides gras à chaîne courte (butyrate) bénéfiques pour la santé. La consommation d'amidon résistant pourrait aider à réduire la glycémie à jeun et celle après les repas, de même qu'améliorer la sensibilité à l'insuline, en particulier chez les diabétiques en surpoids ou en situation d'obésité (4) (5).

BERNARD MARTINEZ POUR SCIENCES ET AVENIR

SOLANACÉES Famille de végétaux comprenant la tomate, l'aubergine, le poivron, le piment, ou encore le tabac.

AMIDON RÉSISTANT Glucide naturellement présent dans la pomme de terre et le riz ou qui se forme par rétrogradation lorsque l'aliment est cuit puis refroidi.

GLYCOALCALOÏDES Groupe de composés contenant de l'azote, naturellement présents dans les plantes de la famille des solanacées afin de les protéger des prédateurs (insectes, animaux) et des agents pathogènes (virus, bactéries, etc.).

Elle est riche en potassium

La pomme de terre nouvelle en fournit 430 mg/100 g (6). Le potassium est un minéral nécessaire à la construction musculaire et utile au bon fonctionnement du système cardio-vasculaire, car il aide à réguler la pression artérielle. La pomme de terre (100 g) apporte aussi des vitamines du groupe B dont la B3 (ou niacine), qui joue un rôle essentiel dans le métabolisme énergétique de l'organisme, et près de 20 % des besoins nutritionnels journaliers en vitamine B6, laquelle intervient dans la synthèse des globules rouges et la formation de l'hémoglobine. Elle est aussi intéressante pour sa teneur en vitamine C (12,8 mg/100 g).

C'est une source d'antioxydants

Ce tubercule renferme des polyphénols, dont les acides phénoliques (acide chlorogénique, acide caféique, etc.) et les flavonoïdes parmi lesquels les anthocyanines, des pigments responsables des couleurs rouge (pélargonidine) ou violette (malvidine, pétunidine, delphinidine et péonidine) des tubercules. Toutefois, la teneur en composés phénoliques peut diminuer selon la cuisson et les conditions de stockage, notamment à des températures proches de 4 °C (7).

La pomme de terre est aussi une source de fibres (1,5 à 2 g pour 100 g), lesquelles freinent l'absorption des graisses et réduisent leur taux dans le sang.

Elle se conserve à l'abri de la lumière

Les pommes de terre s'entreposent dans un endroit sombre afin d'éviter leur germination ainsi que l'accumulation de solanine, un **glycoalcaloïde** reconnaissable aux taches vertes visibles sur la peau. Les glycoalcaloïdes sont toxiques lorsqu'ils sont consommés en grande quantité et peuvent engendrer des douleurs abdominales, des nausées et des vomissements, voire des diarrhées. D'où l'importance de ne pas consommer le tubercule cru, la cuisson réduisant la teneur en solanines. Et toujours retirer les parties vertes de la pomme de terre avant de la cuisiner. ■

Sylvie Boistard

JEAN-MICHEL LECERF Chef du service de nutrition à l'Institut Pasteur de Lille

Elle ne fait pas grossir

« Avec 90 kcal/100 g (contre 270 kcal/100 g pour le pain), la pomme de terre ne fait pas grossir, mais la façon de la cuisiner peut augmenter son indice glycémique (IG) car son amidon est rapidement hydrolysé en glucose. Écrasée en purée, son IG est de 90, cuite en robe des champs (avec la peau), de 65 ; mais il diminue quand on la consomme avec des protéines (viande, poisson, œufs) et surtout en salade, lorsque les pommes de terre ont été refroidies. Outre un IG élevé, la cuisson des frites aboutit également à la formation de composés de Maillard, dont l'acrylamide, néfaste pour la santé. »

(1) Agreste ministère de l'Agriculture.

(2) CNIPT France Agrimer, Opinionway, 2019.

(3) Resistant starch content in a selection of starchy foods on the Swedish market, Elmstahl H., *European Journal of Clinical Nutrition*, 2002.

(4) Effects of the resistant starch on glucose, insulin, insulin resistance, and lipid parameters in overweight or obese adults: a systematic review and meta-analysis, Wang Y. et al, *Nutrition and Diabetes*, 2019.

(5) Resistant starch ameliorated insulin resistant in patients of type 2 diabetes with obesity: a systematic review and meta-analysis, Gao C. et al. *Lipids in health and disease*, 2019.

(6) Table nutritionnelle Ciqual, Anses.

(7) Phenolic compounds in the potato and its byproducts : an overview, Akyol H. et al, *International Journal of Molecular Sciences*, 2016.

BIBRACTE, ANTOINE MAILLIER

Fouille des remparts dans le secteur des Grandes Portes, au sud de la ville antique, en 2022. Bien que le site fasse l'objet de recherches archéologiques continues depuis quarante ans, seuls 5 % de sa surface ont été mis au jour.

Bibracte

La ville gauloise n'a pas livré tous ses secrets

Au cœur du Morvan, au sommet du mont Beuvray, l'une des villes les plus importantes du monde gaulois est fouillée depuis quarante ans. Cet oppidum a abrité jusqu'à 10 000 habitants à son apogée au Ier siècle avant notre ère. Le site témoigne du dynamisme politique et de la puissance militaire du peuple celte des Éduens, un temps allié des Romains avant de rejoindre la grande révolte menée par Vercingétorix.

Par Marine Benoit

On peut dire que Bibracte se mérite. Pour y parvenir, il faut d'abord compter une heure de route depuis la gare la plus proche du Creusot (Saône-et-Loire). Lorsque commencent à se densifier les hêtres et les sapins du parc naturel du Morvan — 1000 hectares d'une forêt nimbée d'un brouillard quasi mystique le jour de notre venue —, une ascension s'impose à travers les bois. Celle du mont Beuvray, qui culmine à 821 mètres. Depuis son sommet, lorsque le ciel est dégagé, il est possible d'apercevoir le mont Blanc. Difficile d'imaginer qu'il y a 2000 ans, s'y dressait l'une des villes les plus importantes du monde gaulois, également capitale du peuple celte des Éduens *(lire l'encadré p. 84)*. Difficile aussi de concevoir qu'en 52 avant notre ère, c'est là que Vercingétorix a harangué les tribus gauloises pour les convaincre de se fédérer face à César et a été élu chef de la révolte. Car ce qu'il reste de Bibracte, qui compta entre 5000 et 10 000 habitants à son apogée au Ier siècle avant notre ère, ce ne sont hélas que des trous de poteau dans la terre, frustrants vestiges en négatif des bâtiments, principalement en bois, et tout au plus quelques pierres oubliées durant des siècles sous la mousse, les fougères et les feuilles mortes.

BRUNO BOURGEOIS

« L'étude de la protohistoire est souvent qualifiée d'archéologie du vide tant les traces matérielles qu'il en reste sont rares », regrette Sophie Krausz, archéologue et professeur à l'université Paris-I Panthéon-

BIBRACTE, ARNAUD MEUNIER

Le site de Bibracte, sur le mont Beuvray (Saône-et-Loire), culmine à 821 mètres d'altitude. Ici le secteur de la Pâture du Couvent, dans la partie nord.

Sorbonne, qui fouille depuis 2019 les Grandes Portes, un secteur méconnu de la ville. « *Il faut déduire à partir de ce qu'on ne voit plus, comme cet immense trou par exemple* », dit-elle en pointant une cavité de 1,25 mètre de diamètre et de 1,13 mètre de profondeur, encore parfaitement visible dans la terre. « *C'est l'empreinte d'un poteau qui se voulait imposant, et donc peut-être de l'implantation d'une tour en bois ou d'une plateforme qui se trouvait au niveau de cette porte principale de la ville, au sommet du* murus gallicus [mur gaulois]. »

Paradoxalement, Bibracte est l'*oppidum* — du nom de ce modèle de villes fortifiées qui se multiplia dans toute l'Europe continentale à partir de la fin du IIe siècle avant J.-C. — le mieux conservé du monde celte. On y trouve encore des pans entiers de ses remparts faits de *murus gallicus (lire l'encadré ci-contre)*, qui avaient tant impressionné César. Mais aussi des traces de ses habitations en bois et de ses grandes demeures aristocratiques à la romaine, de ses ateliers d'artisans du métal ou encore de ses espaces publics. De l'Atlantique à l'Europe centrale, entre 150 et 200 sites connus peuvent être qualifiés d'*oppida*, parmi lesquels ceux de Corent, près de Clermont-Ferrand, du Titelberg au Luxembourg, ou encore de Manching, en Bavière (Allemagne). Mais là où les prospections archéologiques sont toujours limitées dans le temps, pour des questions de financement et de disponibilité des terrains, le site de Bibracte, lui, est fouillé en continu depuis 1984. Une exception due à son statut particulier, puisque le président François Mitterrand, en le proclamant « site d'intérêt national » en 1985, lui a permis d'être subventionné et de devenir un centre de formation pour les protohistoriens du monde entier. Des générations d'étudiants en archéologie ont ainsi appris à manipuler pelles et truelles à Bibracte et ont fréquenté la bibliothèque du majestueux centre de recherche implanté à proximité du site, à Glux-en-Glenne, et signé de l'architecte Pierre-Louis Faloci.

Architectures gauloise et romaine cohabitent

Quarante ans de fouilles, donc, et ce sans compter les toutes premières réalisées au XIXe siècle, entre 1860 et 1890, par Jacques-Gabriel Bulliot (1817-1902). Grâce à elles, les chercheurs ont compris que l'*oppidum* ne fut pas occupé plus de cent ans avant son abandon total, à la fin du Ier siècle avant J.-C., pour une autre place forte, Augustodunum, aujourd'hui Autun (Saône-et-Loire). Ils découvrirent aussi que le site fut remanié tous les vingt ans, en raison de la durée de vie limitée du bois et de l'évolution rapide du style de l'architecture. Ils décelèrent surtout que trois décennies avant l'intégration de son territoire à la nouvelle province romaine de Gaule lyonnaise, le peuple éduen avait choisi de se doter d'une organisation civique à la romaine, comme le prouvent les ruines de son imposant forum (l'espace public central chez les Romains). « *Dès le IIe siècle avant notre ère, les Éduens s'allient à Rome,* rappelle l'archéologue Andrea Fochesato, responsable de la recherche scien-

Chronologie

IVe ET IIIe SIÈCLES AVANT J.-C.
Développement en Gaule des premières formes d'agglomérations, prenant l'aspect de bourgs de marché dénués de fortifications.

FIN DU IIe SIÈCLE AVANT J.-C.
Apparition des premiers *oppida*, qui semblent ensuite se multiplier rapidement. Ceux de Manching, en Allemagne, et de Metz, en Moselle, comptent parmi les plus anciens.

Ier SIÈCLE AVANT J.-C.
Âge d'or des *oppida* celtiques, qui donneront leur nom à la « civilisation des *oppida* ».

51 AVANT J.-C.
Conquête de la Gaule par Jules César. De nombreux *oppida* sont abandonnés au profit de villes nouvelles construites selon le modèle romain (Augustodunum, aujourd'hui Autun).

1867-1907
Découverte par Jacques-Gabriel Bulliot du site de Bibracte après moultes spéculations sur son emplacement (de nombreux savants situaient la cité à Autun) et première campagne de fouilles.

DÉFENSE

Le « murus gallicus », condensé de génie militaire

« *Ce genre d'ouvrage offre un aspect varié qui n'est pas désagréable à l'œil, avec son alternance de poutres et de pierres […] ; il est, de plus, très pratique et parfaitement adapté à la défense des villes, car la pierre le défend du feu et le bois des ravages du bélier.* » C'est en ces termes admiratifs que Jules César parle du *murus gallicus*, le rempart si caractéristique des *oppida*, au chapitre XXIII du livre VII de ses *Commentaires sur la guerre des Gaules*. Par sa structure d'abord, le *murus gallicus* était en effet un petit condensé de génie militaire : son ossature de poutres en bois horizontales disposées parallèlement et reliées entre elles par des traverses perpendiculaires lui conférait une solidité à toute épreuve. De plus, l'épaisse couche de terre et de pierres utilisées pour recouvrir les poutres et former la muraille lui permettait de résister aux assauts par le feu et à la poussée de machines de guerre. À Bibracte, où le *murus gallicus* n'a jamais eu à faire ses preuves (on connaît bien une « bataille de Bibracte » en 58 avant J.-C., mais celle-ci opposait Romains et Helvètes et ne s'est pas déroulée sur l'*oppidum*), les chercheurs ont néanmoins compris au fur et à mesure des fouilles que le *murus gallicus* n'était qu'un élément d'un dispositif plus imposant. « *Le système défensif était en réalité fait d'une succession de talus, de glacis et d'un rempart, le* murus gallicus, *le tout sur une largeur de près de 100 mètres avec un dénivelé d'une vingtaine de mètres* », note Sophie Krausz, qui conduit des fouilles sur une entrée située à l'opposé de la plus grande porte connue du monde celtique — la porte du Rebout, là où Jacques-Gabriel Bulliot commença son exploration de Bibracte en 1867.

BIBRACTE, ANTOINE MAILLIER

Le rempart gaulois est caractéristique des « oppida », avec son alternance de poutres de bois et de couches de terre et de pierres.

tifique sur le site. *Et même s'ils finissent par rejoindre le soulèvement gaulois en 52 avant J.-C., leur durable sympathie pour l'Empire transparaît largement à Bibracte.* » En effet, deux architectures cohabitent : celle faite de bois, typiquement gauloise, et celle en pierre que les élites gauloises sont fières d'afficher au titre de citoyens romains. « *Bibracte est le témoignage d'une ville gauloise en train de se romaniser et, plus largement, d'un monde en transition* », complète l'archéologue.

Mais reste-t-il vraiment des choses à apprendre de Bibracte ? « *Et comment ! Chaque campagne de fouilles permet de soulever de nouvelles questions et, bien sûr, de combler les trous dans nos connaissances* », assure Vincent Guichard, archéologue et directeur de l'établissement public de coopération culturelle qui gère le site. La compréhension du contexte d'apparition de ces villes fortifiées est peut-être l'une des plus grandes avancées de ces dernières années. Dès les IIIe et IIe siècles de notre ère, encouragée par un climat de paix et un meilleur savoir-faire dans l'exploitation des ressources, la population se développe de façon spectaculaire dans toute l'Europe celtique. Elle se regroupe dans des habitats de plaine non fortifiés, « *sorte de bourgs de marché qui n'ont aucun souci de fortification* », explique Vincent Guichard. Ces agglomérations, beaucoup moins spec-

ANDREA FOCHESATO

« Bibracte est le témoignage d'une ville gauloise en train de se romaniser et, plus largement, d'un monde en transition »

Andrea Fochesato, archéologue, responsable de la coordination des campagnes scientifiques du site

Extrémité de manche de « simpulum », une sorte de louche (alliage cuivreux)

Timbres d'amphore à vin (terre cuite)

Perles en verre

BIBRACTE, ANTOINE MAILLIER

Clé en bronze

Ces objets des Ier et IIe siècles avant notre ère font partie des milliers d'artefacts retrouvés à Bibracte et conservés au musée éponyme.

taculaires que les *oppida* et dont de nombreuses se trouvent toujours enfouies sous nos villes actuelles, avaient échappé aux chercheurs jusqu'aux années 1960-1970. « *En affinant la datation des objets, nous avons compris non sans surprise que les* oppida *étaient apparus très vite,* relève l'archéologue. *On sait désormais qu'ils ne sont pas, comme on le pensait jusqu'ici, qu'une simple étape de progrès vers les sociétés urbaines, mais bien le symptôme d'une période de bouleversements.* » En effet, les chercheurs ont identifié ces dernières années les marqueurs archéologiques d'une importante crise survenue en Europe occidentale à la fin IIe siècle avant J.-C. (une recomposition forte des territoires, une chute de la population par endroits…) qu'il leur est impossible de ne plus mettre en parallèle avec les données historiques. « *À la fin du IIe siècle, les Romains sont engagés dans des guerres de grande ampleur contre les peuples du Nord, les Cimbres et les Teutons, qui inaugurent une période d'instabilité qui se prolongera jusqu'à la guerre des Gaules de César* », détaille Vincent Guichard.

Chaque « oppidum » semble raconter sa propre histoire

Les *oppida*, refuges contre l'ennemi avant tout? Pour sûr. « *Mais ils sont bien plus que ça,* nuance Andrea Fochesato. *Ils sont des objets historiques à part entière. Alors que les vestiges que le monde romain nous a légués sont stéréotypés de façon presque terrifiante, on réalise à mesure que nos connaissances s'affinent à quel point les* oppida *sont uniques et racontent leur propre histoire.* » On ne peut d'ailleurs leur trouver qu'un seul point commun : la présence de ce fameux mur d'enceinte monumental, toujours renforcé par une armature en bois. Pour le reste, il semble y avoir autant de variantes qu'il y a d'*oppida.* Ils sont bâtis aussi bien sur les sommets qu'en bord de fleuve, leur superficie peut varier de quelques dizaines à plusieurs milliers d'hectares — Bibracte s'étendait sur environ 200 hectares — et leur structure interne ne semble suivre aucun modèle. Certains, comme Bibracte, ont un réseau d'habitations extrêmement dense, quand d'autres présentent des bâtiments très isolés les uns des autres.

Pourtant, ils ont peut-être aussi en commun quelques secrets bien gardés. « *Dans de nombreux* oppida, *on a identifié des espaces qui ne présentent aucune trace d'architecture,* détaille Andrea Fochesato. *On ne sait toujours pas à quoi ces terrains non construits correspondent, et même avec les nouvelles technologies, on ne parvient pas à combler ces vides.* » À Bibracte, l'exemple le plus parlant est sans doute le sommet du mont, laissé vierge de toute construction. « *Cela nous incite à penser que ce sommet était important pour les Éduens, mais pour quelle raison ? Était-il un lieu sacré ?,* s'interroge l'archéologue. *Nous n'avons hélas aujourd'hui aucun moyen de le savoir.* » Autre énigme : où se trouvaient donc les espaces de stockage, tant pour les denrées de la vie courante que pour l'approvisionnement des armées ? « *César nous dit que les* oppida *sont les lieux où sont stockées les richesses de la Gaule, mais nous n'avons aucun entrepôt, rien. Pas un* oppidum *ne vient nous éclairer.* » C'est peut-être ce qui rend encore ces lieux si intrigants, pour ne pas dire un peu magiques : malgré des décennies de fouilles, ils garderont enfouis à jamais une partie des mystères des peuples celtes. ■

PEUPLES CELTES

Les Éduens, des Gaulois courtisés par Rome

Membres de la soixantaine de peuples celtes que César mentionne entre les Pyrénées et le Rhin, les Éduens s'y distinguaient par leur puissance politique, militaire et économique. Si Bibracte, leur capitale, se trouvait au sommet du mont Beuvray, ils rayonnaient sur un bien plus vaste territoire, qui s'étendait sur une grande partie de la Bourgogne actuelle. Dès le IIe siècle avant J.-C., ils établirent des relations diplomatiques avec Rome, cherchant la protection de cette puissance étrangère pour contrer l'influence de leurs voisins et rivaux, les Séquanes et les Arvernes. Sous la pression, ils finirent pourtant par rejoindre en 52 avant J.-C. la grande révolte gauloise menée par Vercingétorix, chef, justement, des Arvernes. Cependant, après la défaite des Gaulois à Alésia, ils furent intégrés dans le système romain sans grande résistance… et bénéficièrent même d'un statut privilégié.

CapaPictures / Europe 1

LIBRE
DE DÉCRYPTER
L'ACTU

DIMITRI PAVLENKO

7H - 9H

EUROPE 1 MATIN

Europe 1

La renaissance de la cosmologie

En 1917, alors que la Grande Guerre déchire l'Europe, Albert Einstein redonne ses lettres de noblesse à une discipline que l'on croyait morte depuis plusieurs siècles : la cosmologie. Mais pour connaître son premier succès, cette science de l'Univers a dû transformer notre représentation du monde et mettre l'espace lui-même en mouvement.

Par Gauvain Leconte-Chevillard

Les astronomes de l'Antiquité concevaient l'Univers comme un enchâssement d'orbes cristallins centrés sur la Terre et réglés par des mouvements circulaires et uniformes. À cette globalité parfaite et harmonieuse, ils avaient donné le nom de cosmos, un terme qui est resté pour désigner aussi bien l'Univers que les belles choses, les cosmétiques. Mais la révolution copernicienne au XVI^e^ siècle mit la Terre en mouvement autour du Soleil et transforma le cosmos en un univers infini. Dans cette nouvelle conception scientifique du monde, il ne semblait y avoir plus rien à dire sur l'Univers, ce système physique qui englobe tous les autres systèmes physiques : l'espace s'étendait dans toutes les directions, pareil à lui-même, indéfiniment… La cosmologie n'était plus une science empirique mais une branche de la métaphysique.

Ce fut donc avec une certaine audace qu'Albert Einstein publia à Berlin en 1917 un article intitulé « Considérations cosmologiques sur la relativité générale ». Dans cet article, il montra qu'il était possible de concevoir un univers fini mais sans limites, bouclant sur lui-même parce que l'espace y avait une courbure globale positive. Autrement dit, on pouvait décrire l'Univers comme l'équivalent en trois dimensions de la surface d'une sphère, retrouvant ainsi quelque chose du cosmos harmonieux des Anciens. Une telle description de l'Univers n'était possible que parce qu'Albert Einstein avait achevé, quelques années plus tôt, une nouvelle théorie de la gravitation : la relativité générale. Dans cette théorie, l'espace et le temps ne sont pas des cadres vides qui accueillent impassiblement le ballet des phénomènes physiques : ce sont des réalités dynamiques qui sont modifiées par les corps qui y prennent place. Avec la relativité générale, il était donc redevenu possible de tenir un discours scientifique sur l'Univers dans sa globalité, puisque ses équations fondamentales permettaient d'étudier la forme de l'espace-temps à partir des corps observables. Et c'est précisément ce que fit Albert Einstein en 1917. Il supposa que la répartition de la matière dans l'Univers était globalement homogène, qu'elle était stable dans le temps et que les vitesses des étoiles étaient petites par rapport à celle de la lumière — et il en déduisit son modèle d'univers sphérique. Seul problème : pour que ce modèle soit effectivement une solution des équations de la relativité générale, il fallait modifier celles-ci en leur ajoutant une constante, notée « λ », qui fut ensuite connue sous le nom de constante cosmologique.

GAUVAIN LECONTE-CHEVILLARD

Enseignant en philosophie des sciences à l'université de Namur (Belgique) et à l'observatoire de Paris-Meudon, Gauvain Leconte-Chevillard a publié *Histoire d'une science impossible. Cosmologie et épistémologie de 1917 à nos jours*, Éditions de la Sorbonne, 2023.

BRIDGEMAN IMAGES - PHOTO12.COM - AKG IMAGES

Les physiciens et astronomes Albert Einstein (1879-1955), Willem De Sitter (1872-1934), Edwin Hubble (1889-1953) et Georges Lemaître (1894-1966).

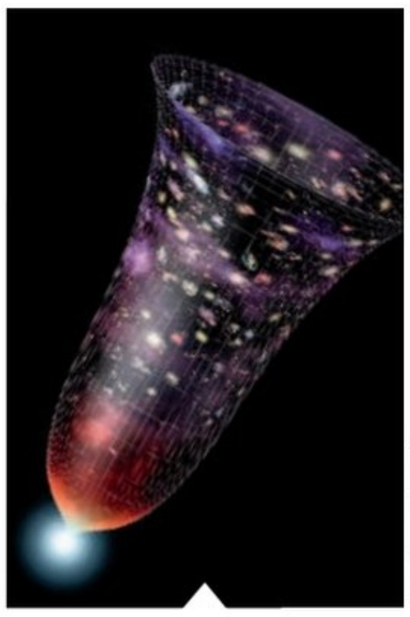
À la même époque, Albert Einstein était engagé dans une correspondance avec l'astronome et mathématicien néerlandais Willem De Sitter. Cette correspondance se tenait au dos de cartes postales qui étaient les seuls courriers autorisés à circuler vers les Pays-Bas, neutres pendant la Première Guerre mondiale. Willem De Sitter publiait ensuite des articles en anglais destinés à faire connaître les recherches d'Albert Einstein en dehors de l'Allemagne. Quand le savant néerlandais prit connaissance de la modification des équations de la relativité générale, il fit remarquer que l'on pouvait concevoir un autre modèle d'univers que celui d'Albert Einstein : un univers dont la densité était égale à zéro mais dont la valeur positive de λ provoquait une courbure globale de l'espace.

Une évolution spectaculaire des observations astronomiques

Pourquoi Willem De Sitter a-t-il proposé un modèle si irréaliste qu'il suppose que l'Univers est vide de toute matière ? Tout d'abord pour montrer qu'il n'y avait pas qu'une seule conception de l'Univers compatible avec la relativité générale. Mais aussi parce que son modèle avait une conséquence intéressante : dans un tel univers, les rayons lumineux émis par deux observateurs éloignés et en repos l'un par rapport à l'autre seraient décalés vers le rouge. Or, de même qu'un son devient plus grave quand une source sonore s'éloigne de nous, un décalage vers le rouge de la lumière indique un éloignement d'une source lumineuse *(lire l'encadré p. 88)*. Ainsi, même si l'Univers de Willem De Sitter était statique comme celui d'Albert Einstein, on devrait y observer un « effet De Sitter » : une récession apparente des galaxies lointaines. Or, quand le Néerlandais proposa son modèle d'univers en 1917, il était au courant que certains astronomes comme l'Américain Vesto Slipher avaient observé un décalage vers le rouge du spectre de certaines nébuleuses que l'on estimait, sans avoir de preuve définitive, être d'autres galaxies que la nôtre : ces objets paraissaient nous fuir, comme si nous étions au centre d'une explosion cosmique. L'effet De Sitter permettait d'expliquer un tel décalage spectral et portait ainsi en lui l'espoir de relier les considérations abstraites des théoriciens de la relativité générale aux observations astronomiques qui connaissaient une évolution spectaculaire à cette époque. En 1924, l'astronome américain Edwin Hubble, utilisant une technique mise au point par sa compatriote Henrietta Leavitt, mesura la distance des nuages de

Magellan et détermina qu'il s'agissait d'objets en dehors de notre galaxie. Continuant sur sa lancée, il estima les distances de 22 autres galaxies et les compara à leur décalage spectral. Malgré des erreurs dans ces mesures, il fit une découverte déterminante : la relation entre le décalage vers le rouge des galaxies et leur distance est linéaire. Autrement dit, plus une galaxie est lointaine, plus elle paraît s'éloigner de nous rapidement. Edwin Hubble publia ses résultats en 1929 et conclut son article en considérant que ses observations pourraient représenter l'effet De Sitter.

Cette découverte d'Edwin Hubble confirma-t-elle, aux yeux des théoriciens, le modèle de Willem De Sitter ? Non, cette histoire connut une fin plus surprenante. Dès 1922, le physicien soviétique Alexandre Friedman publia une série de solutions dynamiques aux équations de la relativité générale représentant des modèles d'univers en expansion ou en contraction. Il décéda trois ans plus tard, sans avoir eu le temps de développer les conséquences astronomiques de ses découvertes. Ce fut le physicien (et prêtre catholique) belge Georges Lemaître qui redécouvrit, sans en avoir eu connaissance au préalable, ces solutions dynamiques et qui montra qu'un univers en expansion pouvait rendre compte du décalage spectral des galaxies. En effet, si l'on suppose que les dimensions d'espace sont en expansion, alors toutes les distances entre les galaxies doivent augmenter avec le temps. On peut donc aisément expliquer qu'un observateur dans l'une de ces galaxies voit toutes les autres galaxies le fuir. Il en découle aussi directement que plus une galaxie est lointaine, plus elle paraît nous fuir rapidement, c'est-à-dire que cette relation est linéaire.



SPL/SUCRÉ SALÉ

Illustration de l'expansion de l'Univers à partir du Big Bang (à gauche).

Georges Lemaître publia ses résultats en 1927, en français, dans *Les Annales de la société scientifique de Bruxelles,* mais ce n'est qu'en 1931, après la traduction en anglais de l'article, qu'il obtint la reconnaissance qu'il méritait. Même Albert Einstein et Willem De Sitter, qui s'étaient opposés, parfois avec virulence, à l'idée d'une expansion de l'espace, se convertirent à cette nouvelle conception de l'Univers et publièrent ensemble un article en 1932 décrivant un modèle d'univers en expansion sans courbure ni constante cosmologique : le modèle Einstein-De Sitter. Comment se fait-il que les travaux du physicien belge aient pu convaincre les plus farouches partisans d'un univers statique ?

Mettre l'espace en mouvement, une solution simple et révolutionnaire

Georges Lemaître avait habilement présenté son modèle d'univers comme une « *solution intermédiaire* » entre le modèle d'Albert Einstein et celui de Willem De Sitter : son modèle était moins irréaliste que celui de ce dernier parce qu'il ne supposait pas de densité nulle, mais il avait les mêmes avantages. En effet, Georges Lemaître avait réussi, deux ans avant la découverte d'Edwin Hubble, à prédire que la relation entre la distance et le décalage spectral des galaxies devait être linéaire ; cette prédiction était très simple, alors qu'il fallait plusieurs pages de calculs compliqués pour prédire cette relation à partir de l'effet De Sitter. C'est cette simplicité qui semble avoir convaincu jusqu'à Willem De Sitter lui-même, déclarant en 1931 dans la revue *Nature* qu'« *une solution d'une simplicité telle qu'elle apparaisse évidente d'elle-même [...] ne peut laisser le moindre doute que la théorie de Lemaître est essentiellement vraie* ».

Ce fut donc en mettant l'espace lui-même en mouvement et en révolutionnant notre conception scientifique de l'Univers que la cosmologie naissante connut son premier succès scientifique. Mais, au cours des années 1930, des explications alternatives du décalage vers le rouge des galaxies virent le jour, qui se prétendaient plus simples. Elles déclenchèrent une controverse scientifique et philosophique qui remit à nouveau en question le statut de science de la cosmologie. Ainsi, malgré son premier succès, la cosmologie dut encore attendre plusieurs décennies pour achever sa quête de scientificité. ■

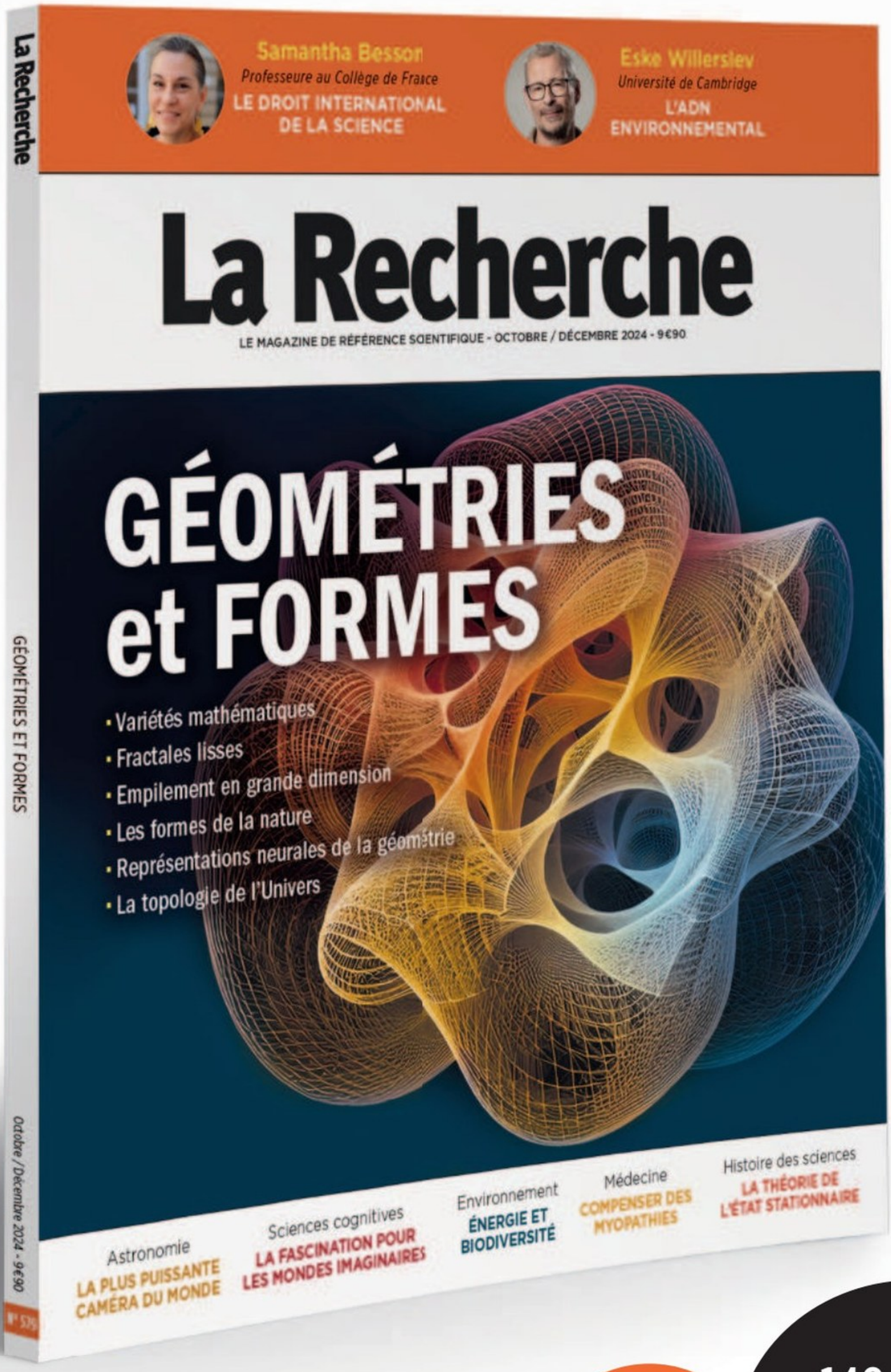
OBSERVATION

Le décalage vers le rouge, signe de l'expansion de l'espace

Le décalage vers le rouge peut être interprété comme un effet Fizeau, l'équivalent pour la lumière de l'effet Doppler, c'est-à-dire la récession d'une source lumineuse. L'explication de ce décalage spectral des galaxies proposée par Georges Lemaître, et qui est toujours acceptée aujourd'hui, est que ce ne sont pas les galaxies qui sont en mouvement, mais l'espace lui-même. Comme chaque galaxie est emportée par cette expansion de l'espace, chacune s'éloigne des autres, et s'en éloigne d'autant plus qu'elle en est loin. Seules les galaxies suffisamment proches pour avoir des interactions gravitationnelles (comme la nôtre et celle d'Andromède) peuvent annuler les effets de cette expansion.

18 SCIENTIFIQUES PARTICIPENT À CE NUMÉRO

La Recherche
LE MAGAZINE DE RÉFÉRENCE SCIENTIFIQUE



Chez votre marchand de journaux

148 pages
MAGAZINE-LIVRE
Trimestriel

TRANSVERSALES

GARY BELL/OCEANWIDE/MINDEN PICTURES/BIOSPHOTO

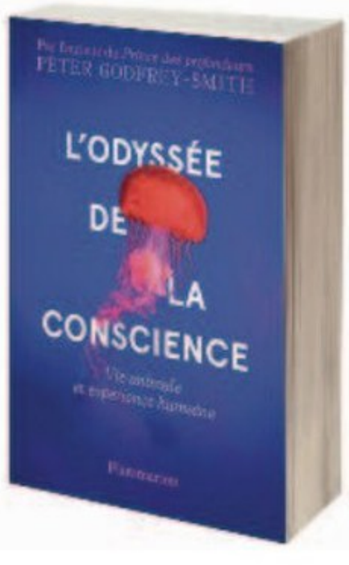
La seiche géante est une des espèces que Peter Godfrey-Smith a étudiées lors de ses plongées.

Conscience animale

Le philosophe des sciences Peter Godfrey-Smith analyse l'évolution des modes d'appréhension de l'environnement de nombreuses espèces marines.

SUBJECTIVITÉ Après avoir exploré dans son précédent ouvrage les origines de la conscience et de l'intelligence chez les céphalopodes, le philosophe des sciences australien Peter Godfrey-Smith élargit ces questionnements aux éponges, coraux mous, crustacés, insectes, poissons et autres mammifères marins. Ses interrogations se nourrissent de ses plongées sous-marines dans les eaux du Pacifique et des multiples rencontres qu'il y fait, dont une crevette manchote très attachante. Les espèces animales présentes bien avant nous sur Terre témoignent de l'évolution des modes d'appréhension de leur environnement. Les aptitudes sensorielles et physiques développées par chacune des espèces leur ont ouvert ainsi une fenêtre différente de la nôtre sur le monde.

L'auteur revisite ici la biologie évolutionniste, rappelant que « *l'histoire de l'esprit et de l'expérience ressentie découle de l'histoire de la vie animale. L'évolution des animaux a produit une nouvelle façon d'être qui implique de nouvelles formes d'engagement avec le monde grâce au sens et à l'action.* » La diversité des formes de la subjectivité dépend du mode de vie de l'animal et des circonstances, constate-t-il. Conscience et point de vue ne seraient ainsi pas l'apanage de l'être humain, mais le résultat multiforme de l'évolution des sens des espèces en fonction de leur biotope et de leur propre trajectoire. L'auteur manie dans cet ouvrage questions philosophiques et recherches biologiques pour interroger l'évolution des esprits qui peuplent la planète. ■ **Sylvie Rouat**



L'Odyssée de la conscience. Vie animale et expérience humaine,
Peter Godfrey-Smith,
Flammarion, 464 p., 24 €

SOMMAIRE

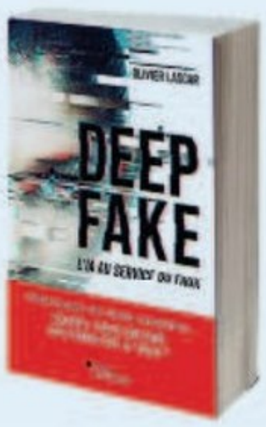
▶ C'est à lire p. 90
▶ C'est à voir p. 93
▶ Chroniques p. 94
▶ Questions de lecteurs p. 96
▶ Le ciel du mois p. 97
▶ Jeux p. 98

La réalité sur les Gaulois

HISTOIRE Les Grecs les appelaient « Galates ». Pour les Romains, les « Gaulois » désignaient les populations autochtones qui vivaient au-delà des Alpes. Ces noms charriaient des stéréotypes méprisants, que l'archéologie, l'histoire et l'anthropologie ont permis de battre en brèche,

comme nous le raconte ce livre documenté et servi par un art consommé du récit. Car la réalité des mondes gaulois — leurs systèmes de pensée, leur organisation politique et sociale, leur art aussi — était bien éloignée des poncifs transmis par les Grecs et les Romains. **V. G.**

Le Monde secret des Gaulois, Laurent Olivier, Flammarion, 416 p., 23,90 €



Réel, où es-tu ?

ENQUÊTE Quand on voit en mars 2023 le pape François en doudoune blanche Balenciaga faire le tour des réseaux sociaux, la perception des *deepfakes*, ces fausses images créées par l'intelligence artificielle, paraît amusante. Quand, en septembre de la même année, le parti populiste de Slovaquie l'emporte aux législatives à la suite d'un *deepfake* audio compromettant son adversaire progressiste, elle change. Le basculement date de 2018, avec une troublante vidéo de Barack Obama insultant Donald Trump. Déjà un faux. Dans son enquête qui remonte aux origines de l'intelligence artificielle, Olivier Lascar, rédacteur en chef digital de *Sciences et Avenir*, s'extrait des analyses universitaires pour éclairer l'impact des *deepfakes* au regard des premiers trucages dans les films de science-fiction. Avec cette question posée depuis Platon : qu'est-ce que le réel ? En pointant, en conclusion, la faiblesse de la réponse législative comme l'errance de la réponse scientifique. **Mathieu Nowak**

Deepfake. L'IA au service du faux, Olivier Lascar, Eyrolles, 176 p., 16,90 €

Lame de fond

AQUATIQUE Cet opus analyse deux phénomènes. Nous vivons aujourd'hui un ensauvagement des eaux, dans

le sillage du changement climatique : inondations gigantesques, ouragans cataclysmiques, chutes de neige mortelles. Un coût dévastateur pour les écosystèmes et les humains. Parallèlement, aux côtés de vagues de chaleur létales, l'eau se fait de plus en rare, dans de multiples régions du monde, y compris la France en été. Après une histoire de l'abondance puis des assèchements en cours, le célèbre essayiste américain affine des solutions écologiques, géopolitiques et sociales. **R. M.**

Planète Aqua, Jeremy Rifkin, Buchet-Chastel, 452 p., 26,50 €

SHAPE-Med Lyon Structuring one Health Approach for Personnalized Medicine

SHAPE-Med@Lyon : 29 projets transdisciplinaires financés depuis le lancement du programme ExcellencES lyonnais

Le programme SHAPE-Med@Lyon, coordonné par l'Université Claude Bernard Lyon 1 sous la présidence du Professeur Frédéric FLEURY, regroupe 13 partenaires pour développer des approches trans-disciplinaires en santé, mêlant médecine 5P et santé unique. Financé à hauteur de 28 millions d'euros par l'ANR dans le cadre du programme ExcellencES de France 2030, SHAPE-Med@Lyon vise à répondre aux défis complexes en matière de santé, tels que le vieillissement, les maladies chroniques, les pandémies, les inégalités d'accès aux soins et les crises climatiques et de biodiversité. Les enjeux environ-nementaux, socio-économiques et comportementaux influencent directement la santé des humains, des animaux et des écosystèmes.

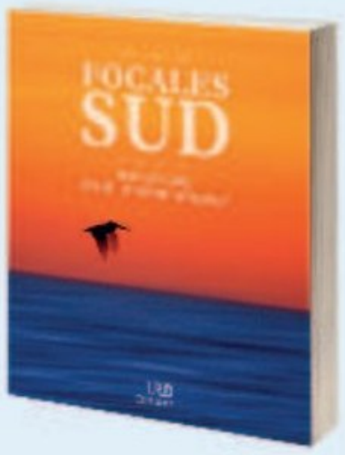
Face à ces défis, des transformations majeures sont nécessaires dans nos organisations politiques et sociales. **SHAPE-Med@Lyon répond à cette urgence avec une approche « One Health » en soutenant des projets transdisciplinaires, réunissant une diversité d'expertises et d'acteurs**. Structuré autour d'un Institut Transdisciplinaire en santé, SHAPE-Med@Lyon garantit une grande liberté créative aux communautés scientifiques. Depuis 2022, 29 projets innovants et transformateurs ont été financés, abordant des sujets allant de la recherche fondamentale à la mise en œuvre de solutions diagnostiques ou inclusives pour les citoyens, ou encore l'étude des impacts des conditions socio-environnementales sur la santé humaine et animale.

Certains projets se concentrent sur le développement de modèles 3D et d'organoïdes pour réduire l'expérimentation animale et encourager une médecine plus personnalisée. Les sciences sociales examinent quant à elles la perception de ces technologies par les patients. D'autres projets explorent les liens entre santé et conditions socio-environnementales, ainsi que les bienfaits de la nature sur la santé. Des approches globales cherchent à renforcer la résilience des cultures face au changement climatique et à mesurer leurs effets sur la nutrition et la santé. Enfin, plusieurs projets étudient la relation entre société, santé et bien-être, en questionnant les pratiques actuelles, en proposant des solutions d'inclusion ou en analysant les facteurs influençant la diffusion des pathogènes.

Université Claude Bernard Lyon 1

Université de sciences, technologies, santé et sport, l'Université Claude Bernard Lyon 1, compte plus de 46 500 étudiantes et étudiants et propose, depuis plus de 50 ans, une formation de grande qualité adossée à une recherche d'excellence produite par 2 800 enseignants-chercheurs au sein de 62 laboratoires de recherche. Les 5 000 personnels qui la composent œuvrent, chaque jour, pour répondre aux missions fondamentales de l'université en formation recherche et innovation. Pluridisciplinaire, tournée vers les grands enjeux sociétaux de notre temps, la recherche à l'UCBL fait avancer la science et progresser la société.

C'EST À LIRE



IRD : pour un monde meilleur

ENGAGEMENT L'institut de recherche pour le développement (IRD) a 80 ans. Et parcouru un long chemin depuis l'ère coloniale. Mais l'ouvrage destiné à fêter cet anniversaire ne revient pas sur cette histoire. Il s'agit ici plutôt de présent et de futur. Présent par le témoignage de chercheurs du Nord et du Sud, retraçant leur collaboration pour éradiquer les maladies, améliorer les modes de vie, promouvoir une agriculture durable. Futur, par la définition d'un avenir désirable où la mortalité infantile, les maladies vectorielles, la pauvreté et les pénuries en eau et en énergie auraient disparu. Cette « science de la durabilité » émerge à travers tout un mouvement scientifique dont l'IRD est l'une des institutions phares. Les chercheurs du Nord et du Sud mettent en commun leurs compétences pour faire émerger des solutions rapidement exploitables pour le développement humain. À travers leurs témoignages, se devine un engagement profond pour un monde meilleur. ■ **Loïc Chauveau**

Focales sud, recherche pour un monde durable, IRD Éditions, 198 p., 28 €

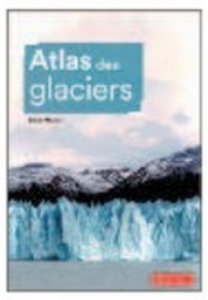
La statistique contre le sens

IA ChatGPT ne raisonne pas. Ne comprend pas. Ne sait pas ce qu'est un mot. On ne devrait même pas le qualifier d'« intelligence artificielle », mais plutôt d'artefact génératif. L'auteur, chercheur en sciences de l'information (voir son blog Affordance), propose une réflexion pointue sur l'effet produit par ChatGPT, Midjourney et autre Dall-E, à savoir une transformation du langage et du sens en des sorties statistiques, des phrases générées par la probabilité et faisant l'objet d'une marchandisation. Cet aspect est bien plus problématique qu'un fantasmatique remplacement de l'humain par l'IA. **A. D.**

Les IA à l'assaut du cyberespace, Olivier Ertzscheid, C&F Éditions, 140 p., 18 €

Géants de glace

PORTRAIT Le jökulhaup, vous connaissez ? Ce mot islandais veut dire le « glacier qui court », il désigne les crues spectaculaires — boues, eau de fonte, sédiments — consécutives à l'activité d'un volcan sous la glace. Une information parmi d'autres à glaner dans cet atlas richement illustré où le professeur Denis Mercier (Sorbonne Université) dresse le portrait des 274 000 glaciers du monde. Le chiffre peut impressionner, mais dans le contexte du changement climatique, ce sont des géants fragiles. **O. L.**



Atlas des glaciers, Denis Mercier, Autrement, 96 p., 24 €

Force brute

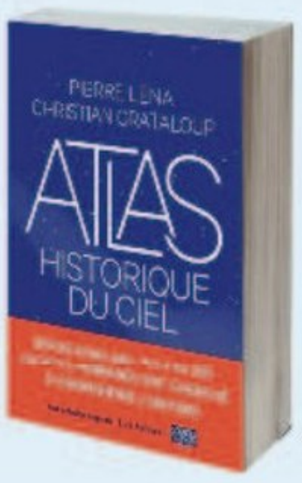
ATTRACTION Qu'est-ce que la gravitation ? En quoi sa compréhension permettrait-elle d'entrevoir la structure profonde du réel ? Chercheuse à l'Imperial College de Londres, l'auteure expose les multiples facettes de cette force qui relie tout, partout et à jamais dans l'Univers, et conserve tant de mystères. Expliquant comment la gravitation est passée du concept newtonien de force universelle instantanée à celui d'Einstein de courbure de l'espace-temps, elle raconte aussi ses propres recherches, notamment une nouvelle théorie appelée « gravitation massive ». **F. D.**

La Beauté de la chute, Claudia de Rham, Quanto, 261 p., 22 €

Histoires d'évolution

BD Vingt-six essais ratés avant d'aboutir à la création du monde tel que nous le connaissons ! D'après le Talmud, Dieu aurait ainsi pas mal expérimenté, et les bizarreries du vivant, actuelles ou disparues, en témoignent. La philosophe Vinciane Despret raconte avec humour des histoires d'évolution et d'adaptation, drôlement croquées par le dessinateur Pierre Kroll. De l'énigme de la queue si peu *« utile »* du paon — cauchemar déclaré de Darwin ! — à l'art consommé de déménageur du bernard-l'ermite, cette savoureuse BD célèbre l'inventivité de la nature. **A. De B.**

Dieu, Darwin, tout et n'importe quoi. Histoires naturelles, Vinciane Despret et Pierre Kroll, Les Arènes, 192 p., 26 €



Héritage céleste

ATLAS Féru de vulgarisation, l'astronome Pierre Léna est venu voir le géohistorien Christian Grataloup, déjà auteur de nombreux atlas, pour lui proposer cet ouvrage original qui mêle l'histoire des sociétés humaines et celle de l'astronomie. Après deux ans de travail, le défi a été relevé en collaboration avec *Sciences et Avenir* et *La Recherche*. Cet atlas permet de rendre compte des découvertes célestes tout en les ancrant dans le cadre géographique et culturel des civilisations qui les ont produites. Des Babyloniens aux Européens de la Renaissance, en passant par les Polynésiens et les Chinois, tous ont interprété et utilisé le ciel pour comprendre le monde. Ce voyage inédit à travers les siècles montre bien comment l'observation du cosmos — d'abord à l'œil nu, puis à l'aide d'instruments de plus en plus perfectionnés — a façonné l'histoire humaine. Un récit érudit et humaniste, rappelant que la contemplation du ciel a toujours été une source d'émerveillement, de questionnements et de progrès pour nos civilisations. ■ **M. N.**

Atlas historique du ciel, Pierre Léna et Christian Grataloup, Les Arènes, 270 p., 27 €

EPPDCSI

Captivant et non dénué d'humour, le spectacle vous aidera à identifier les constellations, connaître leur histoire et devenir incollable en astronomie !

Paris (75) / Spectacle

Pécho sous les étoiles

À l'origine de ce spectacle, un constat : les inexactitudes sont courantes quand on parle d'astronomie (non, l'étoile du Berger n'est pas une étoile, mais une planète : Vénus). Installez-vous confortablement dans les fauteuils de cette salle atypique et levez les yeux vers le dôme étoilé, le chant des grillons en fond sonore : on s'y croirait ! Accompagné par une conférencière, apprenez alors à identifier les constellations et à raconter leur surprenante histoire issue de la mythologie grecque pour ne plus raconter de bêtises. Ainsi, sachez-le : votre signe astrologique est périmé d'à peu près… 5000 ans ! Une démonstration claire vous fera comprendre la réalité scientifique derrière cette symbolique. Au-delà de l'immersion réussie, le spectacle n'est pas avare en anecdotes percutantes, sans oublier de faire sourire. La dernière carte à jouer pour rendre cet événement mémorable est particulièrement réussie. On ne vous en dit pas plus… Lire notre reportage : sciav.fr/933etoiles ■ **Marie Parra**

Planétarium de la Cité des sciences et de l'industrie, 30, Avenue Corentin-Cariou, jusqu'au 4 mai 2025.

EXPOSITIONS

Arc-et-Senans (25)

À l'affût
70 photographies animalières de Vincent Munier nous emmènent des Vosges au Grand Nord. Si la contemplation est à l'œuvre, le parcours interroge aussi la position de l'observateur.
Saline royale, Grand-Rue, jusqu'au 9 mars 2025. Rens. : 03.81.54.45.00.

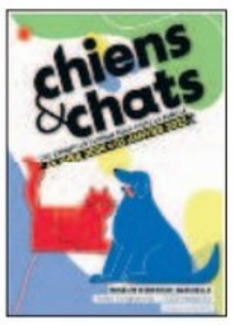
Brest (29)

Cité des océanautes
Cet espace pour les 6-12 ans a ouvert début juillet. Sur 450 m², il permet de découvrir et comprendre la biodiversité marine et des phénomènes comme la bioluminescence, la symbiose, mais aussi la pollution plastique.
Océanopolis, port de plaisance du Moulin-Blanc. Rens. : 02.98.34.40.40.

Grenoble (38)

Planète carbonifère, un temps avant les dinosaures
Il y a 300 millions d'années, commençait à se former ce que l'on allait un jour extraire du sous-sol : le charbon. Plus de 200 fossiles, dont une partie est issue des Alpes, et des fragments de végétaux reconstituent cette période et son écosystème.
Muséum, 1, rue Dolomieu, jusqu'au 15 janvier 2025. Rens. : 04.76.44.05.35.

Marseille (13)



Chiens & chats
Issu de la Cité des sciences et de l'industrie à Paris, ce parcours fait état des connaissances scientifiques, sociologiques et culturelles sur ces animaux de compagnie. En renversant quelques idées reçues.
Muséum d'Histoire naturelle, Palais Longchamp, boulevard Philippon, jusqu'au 5 janvier 2025. Rens. : 04.91.14.59.50.

Nantes (44)

Trésors et biodiversité
Avant la fermeture du musée jusqu'en 2029 pour rénovation, les collections du lieu sont à l'honneur. Des objets stockés dans les réserves ressortent pour l'occasion.
Muséum, place de la Monnaie, jusqu'à fin 2025. Rens. : 02.40.41.55.00.

Chevaliers
Conçue avec le musée Stibbert de Florence (Italie), l'exposition met en valeur armes, armures, objets guerriers du Moyen Âge et de la Renaissance, autant instruments de combat qu'œuvres d'art.
Musée d'Histoire, château des ducs de Bretagne, 4, place Marc-Elder, jusqu'au 20 avril 2025. Rens. : 08.11.46.46.44.

Paris (75)

Empreinte carbone, l'expo !
Concept associé aux activités humaines, l'empreinte carbone donne lieu à un parcours où il est question de l'impact particulier des objets techniques, des usages, mais aussi des solutions possibles.
Musée des Arts et Métiers, 60, rue Réaumur, jusqu'au 11 mai 2025. Rens. : 01.53.01.82.63.

Rennes (35)

Microbiote
Cette exposition, inspirée du livre à succès *Le Charme discret de l'intestin,* explore notre vie intestinale faite de bactéries, de virus, de champignons, essentiels, entre autres, à la digestion.
Espace des sciences, Les Champs libres, 10, cours des Alliés, jusqu'au 9 mars 2025. Rens. : 02.23.40.66.00.

SORTIE BOTANIQUE

Nîmes (30)

Sauvages de ma rue
Une fois par mois, cette sortie de science participative est consacrée aux plantes sauvages poussant en ville. L'occasion d'apprendre à les reconnaître, d'en comprendre l'utilité et d'en faire l'inventaire.
Muséum d'Histoire naturelle, 13, boulevard Amiral-Courbet, jusqu'au 12 juin 2025. Rens. : 04.66.76.73.45.

Scannez ce QR code et retrouvez toutes les expositions dans notre guide

Christophe Cassou, directeur de recherche au CNRS, auteur principal du 6e rapport du Giec (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat), groupe 1.

Céline Guivarch, directrice de recherche à l'École des ponts, auteure principale du 6e rapport du Giec, groupe 3.

A. BILLET / UNIVERSCIENCE

CLIMAT PAR CHRISTOPHE CASSOU ET CÉLINE GUIVARCH

Les forêts brûlent... et nous regardons ailleurs !

Que cela soit en Amérique du Nord ou en Sibérie, la forêt boréale brûle chaque été et rejette chaque année des milliards de tonnes de CO_2 dans l'atmosphère, ainsi que des suies qui viennent se déposer sur la glace arctique et en accélérer la fonte. Et l'été 2023 affiche un record. L'effet combiné des incendies et d'une sécheresse exceptionnelle sur tout le bassin amazonien — en lien avec l'événement El Niño, qui amplifie l'assèchement chronique dû aux effets anthropiques —, est tel que le puits de carbone terrestre s'est effondré l'an passé. Avec pour conséquence une hausse annuelle sans précédent de la concentration atmosphérique de CO_2. Effondrement épisodique ou bien tendance lourde ? Nous savons que l'efficacité globale des puits de carbone, qui absorbent le CO_2 anthropique, diminue avec chaque dixième de réchauffement global. Mais si les valeurs de 2023 se répètent dans les années qui viennent, il est probable que nous en ayons sous-estimé l'effet, ce qui serait une très mauvaise nouvelle. Cette perte d'efficacité des puits nécessiterait de réduire encore plus vite les émissions anthropiques. Autre signe d'inquiétude : sous l'effet du réchauffement, les zones humides naturelles commencent à dégager davantage de méthane, autre gaz à effet de serre puissant. L'ensemble constitue un effet amplificateur qui dope les risques climatiques. Le diagnostic n'est guère plus réjouissant à l'échelle nationale. Malgré des émissions en baisse, la France ne respecte pas ses objectifs de budget carbone sur l'exercice quinquennal 2019-2023 à cause d'un puits de carbone déficient sur le territoire (dépérissement des forêts, dégradations des sols…). Rappelons que les milieux naturels sont nos meilleurs alliés pour lutter contre le changement climatique. Les protéger est une priorité. ■

Directrice de recherche au CNRS, Institut de recherche en informatique fondamentale (CNRS/université Paris Cité).

CLAIRE MATHIEU

MATHS PAR CLAIRE MATHIEU

Entre confiance et déni

Entre ces deux attitudes, laquelle est adéquate ? La confiance aveugle : *« Nous, on peut se tromper, mais vous les chercheurs, dans votre domaine, vous ne vous trompez pas. »* Le déni de la vérité scientifique rabaissée au rang de simple opinion : *« Moi, le réchauffement climatique, je n'y crois pas. »* Pour cela, deux préliminaires pour les journalistes scientifiques qui servent d'intermédiaires entre chercheurs et grand public : il faut essayer de comprendre au mieux les raisons scientifiques des affirmations du chercheur ; mais aussi vérifier qu'il peut être vu comme « porte-parole » de sa communauté, c'est-à-dire que ses affirmations reflètent un consensus. D'où l'importance du travail de formation — enseignement et vulgarisation — par les chercheurs d'une part, et de l'organisation des communautés scientifiques pour exprimer collectivement les conclusions qui, à un moment donné, font consensus dans le domaine, d'autre part. Cela n'empêchera pas les erreurs puisqu'en science, les connaissances sont toujours perfectibles et que les chercheurs ne sont exempts ni des pressions ni des biais du monde dans lequel ils vivent ; mais c'est le mieux que l'on puisse faire. Quant aux personnes qui font la recherche elles-mêmes, il est de leur responsabilité de toujours revisiter ce qui dans leur domaine est considéré comme acquis, pour le remettre en question à la lumière des progrès scientifiques. ■

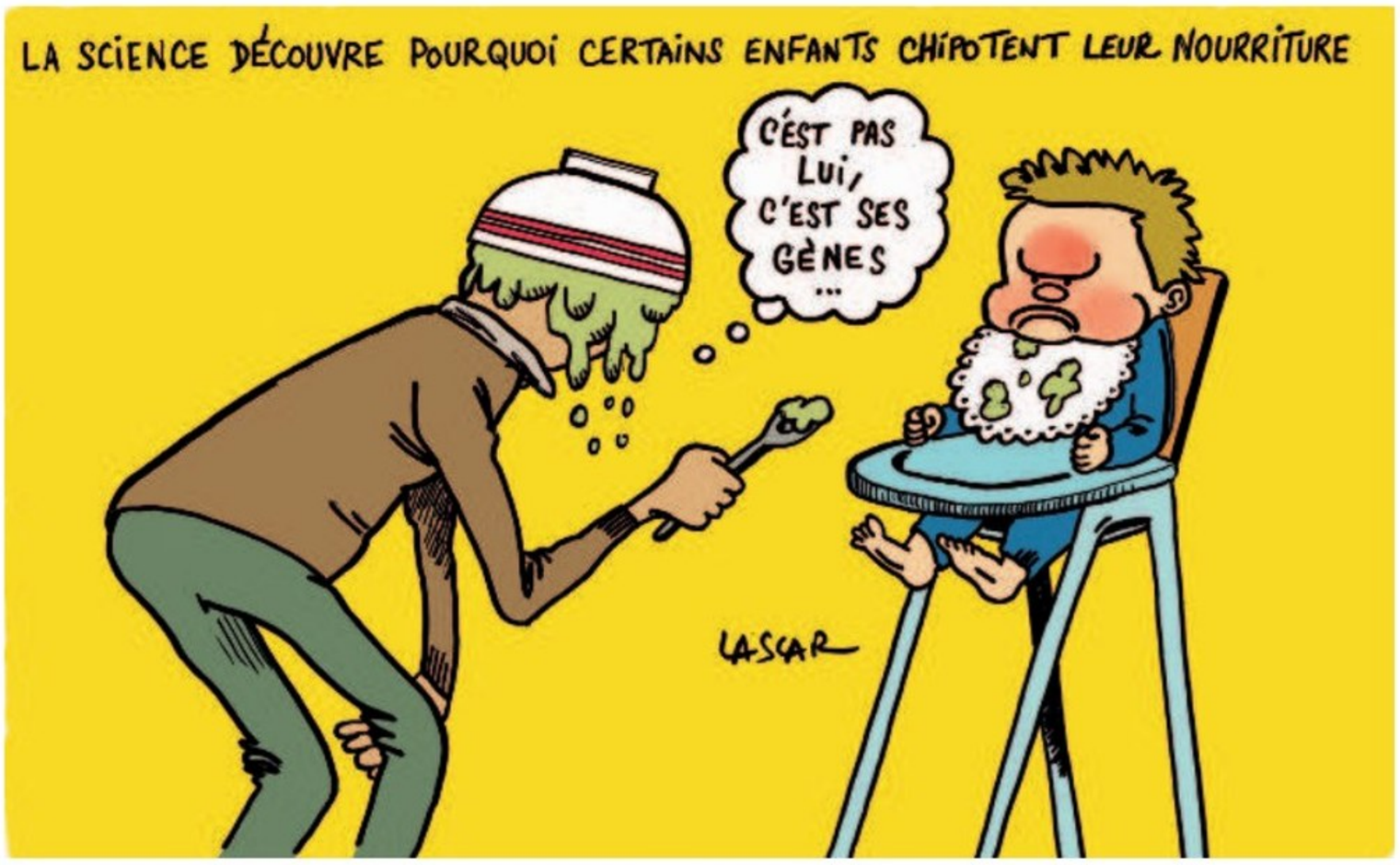
ÉTHIQUE PAR JEAN-GABRIEL GANASCIA

Jusqu'où défendre la liberté d'expression ?

Professeur à Sorbonne Université, à Paris, chercheur en intelligence artificielle au LIP6 (Sorbonne Université, CNRS), ex-président du comité d'éthique du CNRS. Dernier ouvrage publié : *L'I.A. expliquée aux humains*, Seuil, 2024.

Selon l'article XI de la Déclaration des droits de l'homme et du citoyen de 1789, *« la libre communication des pensées et des opinions est un des droits les plus précieux de l'homme »*. Bien peu en disconviennent. Aussi l'arrestation, en France le 24 août, du fondateur et patron de la messagerie Telegram, Pavel Durov, a-t-elle pu, de prime abord, choquer certains de nos compatriotes épris de liberté. Rappelons à cet égard que cette messagerie a permis à des opposants à Vladimir Poutine d'exprimer leurs opinions sans entraves. Cependant, elle contribue aussi à toutes sortes de trafics illicites d'armes et de drogues, de spéculations occultes, de commerces frauduleux et de diffusions d'infox, d'images pédopornographiques ou de *deepfakes*, supports de diffamations et d'incitations à la haine. D'où les accusations lancées à l'encontre de son directeur. Il convient, tout en promouvant la liberté d'expression, de lui assigner des limites, comme le stipule la suite de l'article XI susmentionné : *« Tout citoyen peut donc parler, écrire, imprimer librement, sauf à répondre de l'abus de cette liberté, dans les cas déterminés par la loi »*. Or, on ne parvient pas à réprimer ces abus sur le cyberespace et ce, pour trois raisons au moins. La première tient à la masse de messages échangés ; la deuxième, au statut mi-privé, mi-public des médias sociaux ; la troisième, à leur extraterritorialité, qui leur assure une forme d'impunité tout en introduisant un certain flou dans la loi. Les institutions européennes ont essayé, avec le Digital Service Act (DSA) entré en vigueur le 16 novembre 2022, de faire en sorte que les lois communes s'appliquent sur le cyberespace et que les opérateurs de messagerie coopèrent. Or, ce règlement n'a pas empêché le réseau X (ex-Twitter) de disséminer les vidéos du Hamas sur les massacres du 7 octobre 2023. L'arrestation de Pavel Durov par les autorités françaises montre qu'elles ne font pas confiance au DSA pour assurer la police du cyberespace et que les législations nationales peuvent y pourvoir seules, sans le DSA… ■

BRUNO LÉVY



L'ŒIL DE LASCAR

« Une cuillerée pour papa… *Une cuillerée pour maman… »*

Ça ne marche pas toujours. Selon une étude de l'University College de Londres (Royaume-Uni), le caractère chipoteur de certains enfants s'expliquerait par la génétique. C'est la conclusion à laquelle sont parvenus des chercheurs ayant analysé le comportement de près de 4000 jumeaux, des vrais et des faux. L'intérêt de les comparer ? Les premiers ont le même environnement, mais aussi les mêmes génomes, alors que les seconds ne partagent que l'environnement et ne sont pas identiques génétiquement. **O. L.**

QUESTIONS DE LECTEURS

Sur notre site **sciencesetavenir.fr,** la rédaction répond à des questions scientifiques posées par nos lecteurs sur notre page **Facebook.** En voici une sélection.

EXOPLANÉTOLOGIE

Les exolunes seraient-elles susceptibles d'abriter des extraterrestres ?

Gerard C.

Les exolunes pourraient être le meilleur endroit où rechercher une vie extraterrestre. Elles seraient bien plus nombreuses que les exoplanètes, ce qui augmente les chances de découvrir des formes de vie. Et contrairement aux géantes gazeuses telles Jupiter ou Saturne, elles pourraient abriter des environnements rocheux habitables, à l'image d'Europe ou d'Encelade. En 2018, des chercheurs australiens ont montré que ces satellites pourraient même être « super-habitables », encore plus favorables à la vie que la Terre, grâce à plusieurs sources d'énergie : leur étoile, leur planète et les forces de marée générées par celle-ci. ■ **Franck Daninos**

ARCHÉOLOGIE

Quand les caries dentaires sont-elles apparues ?

Outahar L.

Les plus anciennes traces de caries dentaires, ces lésions causées par des bactéries qui prolifèrent avec la consommation de sucre, datent de 55 millions d'années. Elles ont été découvertes sur les dents de *Microsyops latidens*, un petit primate qui a vécu au moment de l'essor et de la diversification des arbres à fruits, d'où son régime alimentaire frugivore. Sur un seul fossile de ce primate, près de 80 traces suspectes de caries ont été identifiées ! Aucune trace de carie n'ayant jamais été trouvée sur une autre classe animale, on suppose qu'elle est le propre des mammifères frugivores… et des humains avides de bonbons ! ■ **Joël Ignasse**

JEAN-FRANÇOIS NOBLET / BIOSPHOTO

Les souris, qui n'hibernent pas, peuvent être placées dans un état similaire.

PHYSIOLOGIE

Les humains pourraient-ils hiberner comme les animaux ?

Larisa KD

Plonger l'être humain à volonté dans un état de métabolisme ralenti, voilà qui évoque certaines œuvres de science-fiction dans lesquelles les héros émergent de caissons vitrés au terme de plusieurs années de voyage spatial. Si ces expériences n'ont pas été réalisées sur l'humain, ce procédé prend un peu plus corps grâce à deux études publiées en 2020 chez la souris et le rat. Ces travaux s'appuient sur l'activation d'un groupe de neurones appelés « neurones Q », situés dans l'aire préoptique médiane. En les activant, certains mammifères, même ceux qui n'hibernent habituellement pas, peuvent être plongés dans un état similaire à l'hibernation. C'est le cas des souris, dont une équipe américaine est parvenue à diminuer la température corporelle (passant de 37 °C à 23 °C), à ralentir le rythme cardiaque et le métabolisme, tout en étant capable de les faire revenir à leur état initial sans dommage. Une équipe japonaise a réussi à obtenir le même résultat chez des rats en activant ces mêmes neurones.

Ces résultats suggèrent que le mécanisme d'hibernation est préservé chez divers mammifères, mais pas activé chez tous. Si des neurones similaires sont un jour découverts chez l'humain, leur activation pourrait permettre par exemple d'induire une hypothermie thérapeutique après une crise cardiaque ou un AVC (pour limiter les dommages tissulaires). Cette découverte pourrait aussi faciliter la réalisation de voyages spatiaux de longue durée. ■ **Camille Gaubert**

LE CIEL DE NOVEMBRE

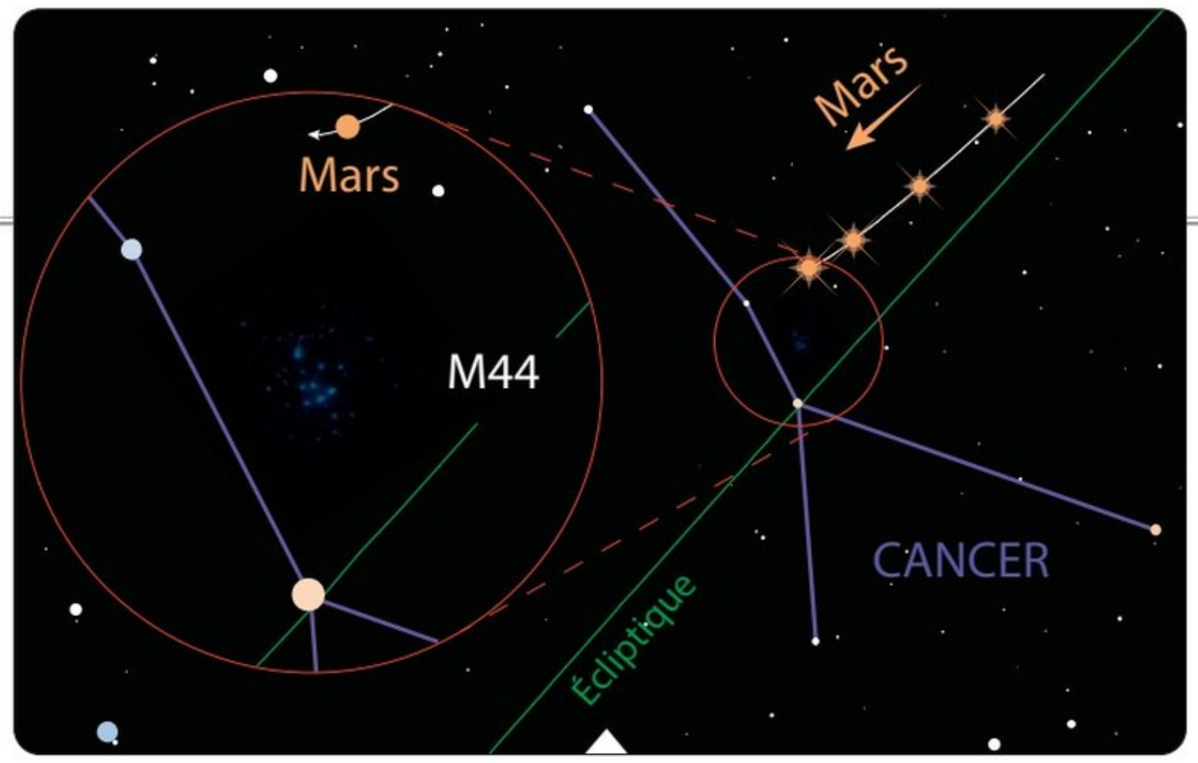
PAR JOHAN KIEKEN

Où sont les planètes ?

MERCURE Bien que la petite planète atteigne sa plus grande distance angulaire (près de 23°) à l'est du Soleil le 16, elle n'est pas observable sous nos latitudes, beaucoup trop basse dans les lueurs du couchant.

VÉNUS Profitant du redressement de l'écliptique et de l'augmentation de sa distance angulaire au Soleil, l'étoile du Berger devient mieux visible en soirée vers le sud-sud-ouest. Le 1er, elle se couche 1h45 après l'astre du jour et 2h55 après lui le 30.

MARS La planète Rouge se lève en soirée, culmine très haut dans le ciel de fin de nuit et reste visible jusqu'au petit matin. Son éclat augmente quotidiennement et désormais, seules Jupiter et Sirius, l'étoile la plus brillante du ciel nocturne, la dépassent en luminosité.



La position de Mars est donnée les 1er, 10, 20 et 30 novembre. Le cercle à gauche représente un zoom aux jumelles centré sur M44.

Mars en route vers l'amas d'étoiles M44

EN TANT QUE PLANÈTE, Mars se déplace dans les constellations du zodiaque. Elle rencontre ainsi des objets du ciel profond, comme M44. Cet amas d'étoiles, surnommé la Crèche, est accessible à l'œil nu sous la forme d'une nébulosité et se révèle somptueux dans un instrument d'optique.

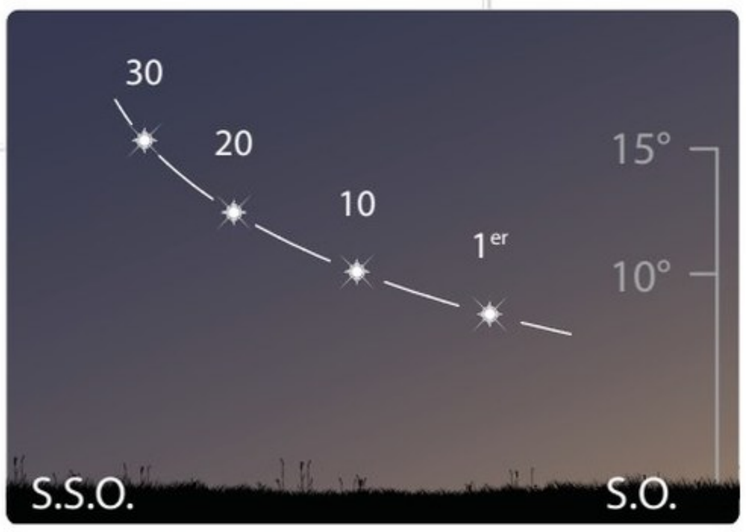
Notre conseil En seconde partie de nuit, vous n'aurez pas de difficulté à déceler, haut dans le ciel, Mars et son brillant éclat couleur caramel. Aux jumelles, notez son déplacement quotidien parmi les étoiles voisines et son rapprochement de M44 en fin de mois.

JUPITER À moins d'un mois de son passage à l'opposition, Jupiter se trouve dans d'excellentes conditions d'observation. Elle se lève au moment où le ciel s'assombrit et, une fois Vénus couchée, s'impose comme l'astre le plus lumineux du ciel.

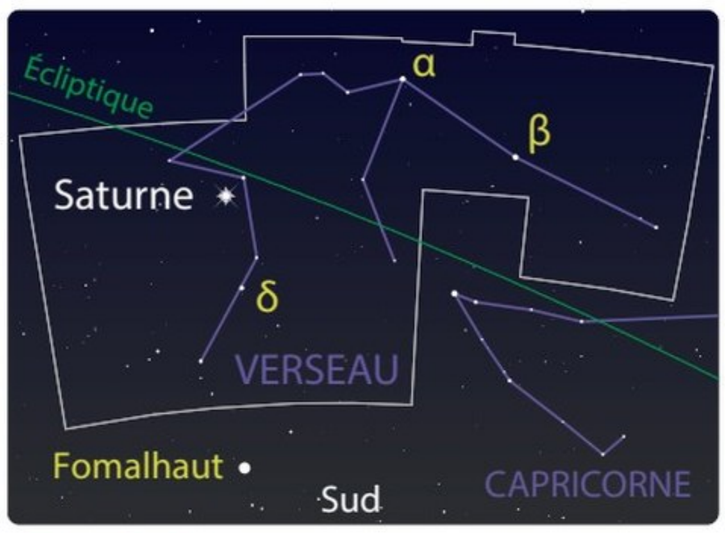
SATURNE La planète aux anneaux se dévoile dès la tombée de l'obscurité vers le sud, alors qu'elle est proche de sa culmination à une bonne trentaine de degrés de hauteur. Elle se couche en milieu de nuit.

L'appli du mois

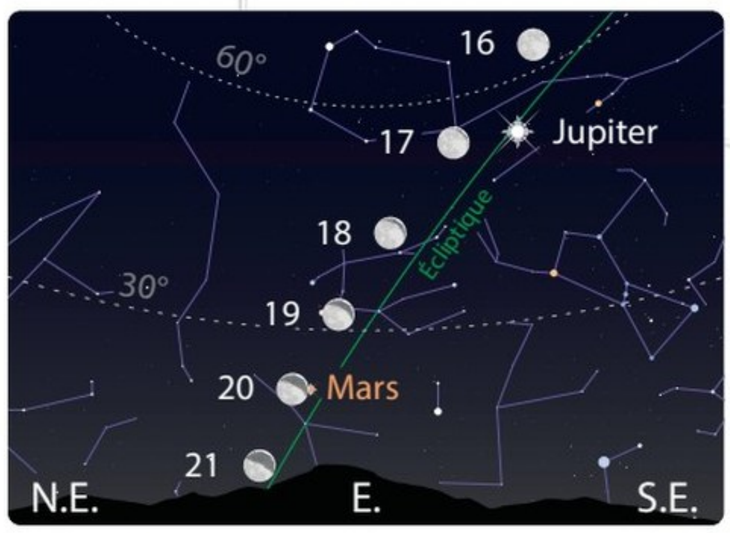
ÉPHÉMÉRIDE est une application gratuite en français pour Android. Elle permet de connaître avec précision la position du Soleil et de la Lune à n'importe quelle heure de la journée, pour n'importe quelle date et en tout lieu avec des outils comme boussole, carte et graphiques.



LA PLANÈTE VÉNUS PRENANT DE LA HAUTEUR AU COURS DU MOIS, ses conditions d'observation s'améliorent sensiblement. Nous sommes ici 30 minutes après le coucher du Soleil.



DÉNUÉ D'ÉTOILES REMARQUABLES, LE VERSEAU est une constellation du zodiaque qui trône vers le sud en soirée. Il héberge la planète Saturne, et ce jusqu'en avril 2025.



LES 16 ET 17, VERS MINUIT, observez la Lune presque pleine passer au large de Jupiter, puis le 20, en phase gibbeuse décroissante, accompagner Mars dans son ascension.

Scannez ce QR code pour découvrir la carte du ciel de novembre

JEUX

PAR PIERRE BERLOQUIN

SOLUTIONS DANS LE PROCHAIN NUMÉRO

▸ Opération Printemps

Dans cette opération, chaque lettre représente un chiffre. Saurez-vous retrouver la correspondance lettre - chiffre ?

L U N D I

\+ M A R D I

A V R I L

▸ Restaulogique

Dans la logique de ce menu, quel prix devrait être affiché pour le café et les liqueurs ?

Menu

Hareng pomme à l'huile 8
Poisson du jour 6
Petit salé aux lentilles 9
Fromages régionaux 8
Fruits ou gâteaux frais.....10
Café et liqueurs.....?

▸ Surfing

Les enfants rentrent de la plage. Leur mère demande : Qui a fait du surf ce matin ?

Leur père répond :

Je n'ai pas fait très attention, mais je pense que...

Axel et Béatrice ne sont pas partis ensemble.

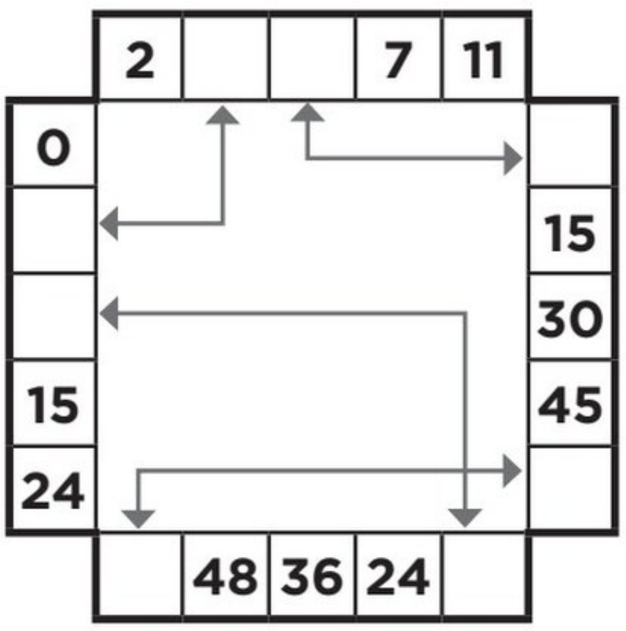
Si Axel a fait du surf, il n'y est pas allé seul.

Si Étienne en a fait, Axel et Béatrice étaient avec lui.

Quelle est votre solution ?

▸ Logique fléchée

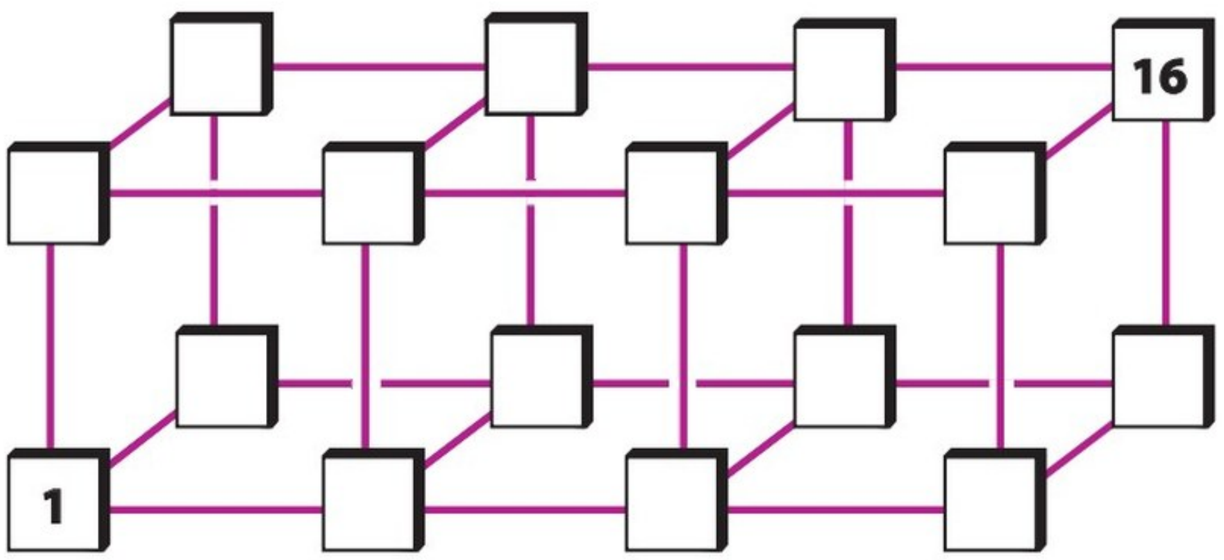
Chaque ligne et chaque colonne correspondent à une suite logique. Complétez en sachant que les flèches relient des cases identiques.



▸ Sudokubik

Complétez cette construction avec les nombres de 2 à 15 tous différents de telle sorte que deux nombres qui se suivent, par exemple 3 et 4, ne se touchent pas par une arête.

Bâtirez-vous une des constructions possibles ?



Solutions des jeux parus dans « Sciences et Avenir » n° 932, octobre 2024

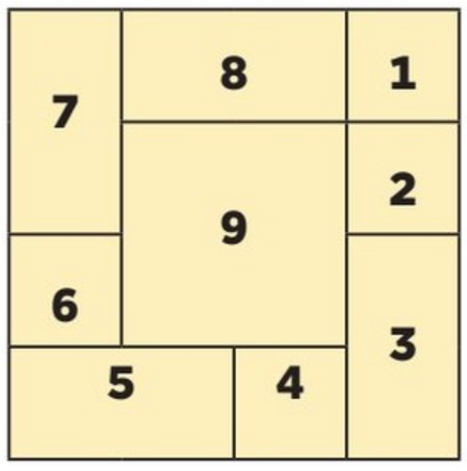
▸ Les euros d'argent

Une solution consiste à comparer au hasard 3 pièces avec 3 autres.

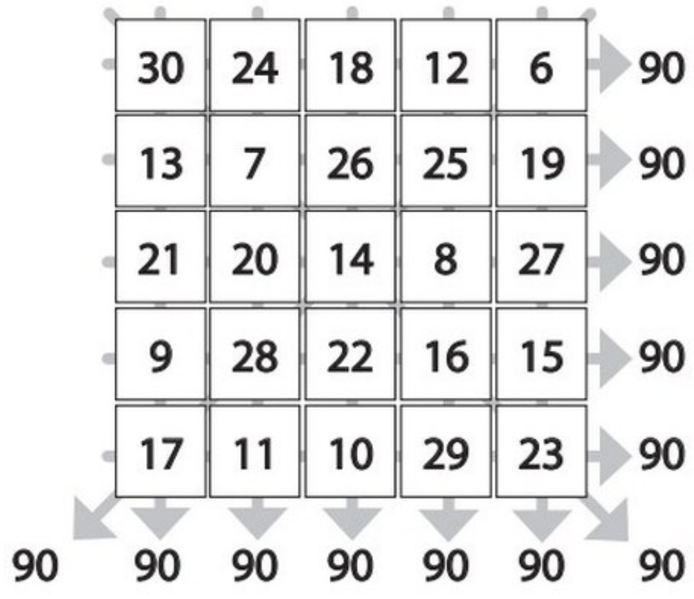
Si les plateaux ne s'équilibrent pas, la fausse pièce est dans le plateau le plus haut. Il compare alors 2 des 3 pièces. Si elles s'équilibrent, la troisième est fausse. Sinon, la plus légère est fausse.

Si, à la première pesée, les plateaux s'équilibrent, une des trois pièces restantes est fausse. Il en compare deux au hasard. Si les plateaux s'équilibrent, la neuvième est fausse. Sinon, la plus légère est fausse.

▸ Pavage sauvage



▸ Magie arithmétique



▸ Sept hommes et un bateau

Dans une opération de base, les 2 enfants traversent et l'un revient seul.
On répète ensuite 7 fois l'opération où : un homme traverse seul ; un enfant ramène le bateau ; les 2 enfants traversent, l'un ramène le bateau.

▸ Chasse aux signes

(1 + 2) x 3 - 4 - 5 + 6 + 7 + 8 + 9 = 30

Énigmes Créalude, Pierre Berloquin

LABORATOIRES
ILAPHARM
www.ilapharm.com

A vos côtés, pour votre santé !

Entreprise familiale française depuis 1992, nous vous proposons le meilleur des plantes pour une santé chaque jour renforcée.

OFFRE Découverte
Dès **5€**

**Offre valable 1 mois, 1 seule fois, réservée aux nouveaux clients. Non cumulable avec d'autres offres promotionnelles en cours.*

Code privilège : **CS454**

Jambes lourdes
VIGNE ROUGE BIO

Active votre circulation sanguine pour des **jambes légères et confortables**.

6€ 45 gélules

Mobilité articulaire
HARPAGOPHYTUM BIO

Conservez des **articulations souples, mobiles** et en bonne santé. *(1)*

5€ 45 gélules

Brûle-graisse
GUARANA BIO

Boostez **l'élimination des graisses et la perte de poids**. *(1), (7), (9)*

6€ 45 gélules

Libido
MACA BIO

Source d'énergie et aphrodisiaque, elle **stimule le désir sexuel. Idéal avec le Safran BIO !**

7€ 45 comprimés

Os et articulations
SILICIUM ORGANIQUE et Vitamine C

Vitamine C (formation du collagène) et **Silicium** (constituant naturel) pour vos os et cartilages.

7€ 45 gélules

Ballonnement
CHARBON & FENOUIL BIO

Soulage rapidement en cas de **ballonnement** et **flatulences**. *(10)*

6€ 45 gélules

Prostate
HUILE DE COURGE BIO

Aide au bon fonctionnement de la **prostate** et de la **vessie**. Pour un **bon confort urinaire**.

7€ 45 capsules

Fatigue nerveuse
MAGNÉSIUM MARIN et B6

Il contribue au bon fonctionnement de votre **système nerveux**.
*Allergène : **poisson**. (4), (6)*

5€ 45 gélules

Cholestérol
AIL NOIR BIO

Il aide au maintien d'un **taux normal de cholestérol** dans le sang. *(5), (11)*

6€ 30 gélules

Érection
SAFRAN BIO

Le Safran participe au maintien de la **fonction érectile**. **Idéal avec la Maca BIO !** *(2)*

7€ 20 gélules

Un esprit vif
GINKGO BILOBA BIO

Arbre de jouvence, il favorise votre circulation cérébrale pour un **esprit vif et alerte**. *(2), (5), (13), (14)*

5€ 45 gélules

Foie - Draineur
ARTICHAUT - RADIS NOIR BIO

L'artichaut favorise le **fonctionnement du foie et détoxifie**. *(7)*

6€ 10 ampoules ~~15,60€~~

Endurance et puissance
TRIBULUS

Il favorise la **capacité** et les **performances sexuelles**. *(8)*

6€ 45 gélules

Sommeil
PASSIFLORE BIO

Calmante et apaisante, elle procure un **sommeil de qualité**. Ni accoutumance, ni somnolence.

6€ 45 gélules

Articulations
FRÊNE BIO

Pour le bon fonctionnement des articulations. **Gardez le plaisir de bouger !** *(9), (12)*

5€ 45 gélules

Capital-vision
MYRTILLE MYROBALAN BIO

Préservez votre vision au quotidien (bonne clarté visuelle) ! *(15)*

7€ 10 ampoules ~~17,90€~~

VOS 3 CADEAUX

La Brosse à dents électrique

OFFERTE

Fournie avec 1 tête de brossage et 1 capuchon de protection.
Fonctionne avec 2 piles LR06-AA (non fournies).
Dim. : 20,6 x 3,5 cm.

+ Les Frais de Port 0€ Dès 15€ d'achat *Au lieu de ~~6,50€~~*

+ dès 5€ Tous vos produits

EXEMPLE :

Harpagophytum BIO	5€
Charbon & Fenouil BIO	6€
Huile de Courge BIO	7€
Safran BIO	7€
Maca BIO	7€
Brosse à dents électrique	**OFFERTE**
Frais de port	**OFFERTS**
TOTAL	**32€**

Tous nos produits sont déconseillés aux enfants de moins de 18 ans et aux femmes enceintes ou allaitantes. (1) Déconseillé en cas d'ulcère gastrique ou duodénal et de calculs biliaires. (2) Ne pas associer avec des antidépresseurs. (3) Contient de la caféine (50 mg par jour). (4) Déconseillé aux insuffisants rénaux. (5) Ne pas associer avec des anticoagulants. (6) Possible effet laxatif. (7) Déconseillé en cas de troubles de la thyroïde. (8) Déconseillé en cas de traitement antihypertenseur ou antidiabétique. (9) Déconseillé en cas de troubles cardiaques (contient de la caféine). (10) Déconseillé en cas de d'allergie croisée connue, en particulier à la famille des Apiaceae ou au pollen d'armoise ou à l'anéthole. (11) Déconseillé en cas de traitement concomitant par un médicament anti-rétroviral. (12) Déconseillé en cas d'insuffisance rénale œdémateuse. (13) Déconseillé aux personnes épileptiques. (14) Déconseillé en cas d'opération chirurgicale. (15) En cas de troubles digestifs, consultez votre médecin avant consommation. Les éventuelles traces d'allergènes sont indiquées sur l'étiquetage des produits.

NOS GARANTIES

PAYEZ DANS 1 MOIS

*Envoyez votre **réglement par chèque**, **avec votre bon de commande**, il ne sera encaissé que dans 1 mois.*

Charte Qualité fevad · synadiet · La Poste 72h

POUR COMMANDER

C'EST FACILE
sur notre site internet :
www.ilapharm.com

01 49 09 11 11
Du lundi au vendredi :
9h -13h et 14h -18h

Laboratoires ILAPHARM
C/O BSL - BP 60475
35171 BRUZ CEDEX

COMMANDE "OFFRE DÉCOUVERTE" - SANS ENGAGEMENT

Vos coordonnées ☐ Mme ☐ Mr

Nom, Prénom : .....
Adresse : .....
.....
Code Postal : |_|_|_|_|_| Ville : .....
Tél. : ..... Date d'anniversaire : |_|_| |_|_| |_|_|_|_|
E-mail* : .....
pour recevoir les **Offres mails de nos partenaires** ☐ **OUI** ou ☐ **NON**
** Recommandé pour la livraison.*

Choisissez votre mode de paiement

☐ **Par carte bancaire (débit immédiat uniquement) :**
N°|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|
Date d'expiration : |_|_|_|_|
Chiffres inscrits au dos de ma carte : |_|_|_|
Signature :

☐ **Par chèque, je choisis :** ○ débit immédiat ○ débit dans 1 mois à l'ordre des Laboratoires ILAPHARM

NOM DU PRODUIT	RÉF.	QTÉ	PRIX RÉDUIT	TOTAL
Vigne Rouge BIO	PVRB45		6€	
Harpagophytum BIO	PHAB45		5€	
Guarana BIO	PGUB45		6€	
Maca BIO	PMAB45		7€	
Silicium Organique et Vitamine C	PSV45		7€	
Charbon & Fenouil BIO	PCFB45		6€	
Huile de Courge BIO	PPCB45		7€	
Magnésium Marin et B6	PMM45		5€	
Ail Noir BIO	PANB30		6€	
Safran BIO	PSFB20		7€	
Ginkgo Biloba BIO	PGBB45		5€	
Artichaut - Radis Noir BIO	PXRAB		6€	
Tribulus	PTR45		6€	
Passiflore BIO	PPAB45		6€	
Frêne BIO	PFNB45		5€	
Myrtille Myrobalan BIO	PXMMB		7€	
☐ Je reçois **gratuitement** ma **Brosse à dents électrique** et mon **Catalogue**				OFFERTS
☐ Ma commande atteint 15€, **j'économise 6,50€ sur les frais de port**				OFFERTS
☐ Ma commande est inférieure à 15€, **je rajoute 6,50€ de port**				
Code privilège : **CS454**			**TOTAL À RÉGLER**	.....€

Laboratoires ILAPHARM SAS au capital de 38 112€, RCS Nanterre B 384 620 878 - 27 rue de Solférino - 92100 Boulogne. Tél Sce client 01.49.09.11.11. Offre et frais de livraison valables en France Métropolitaine. En cas d'indisponibilité de votre cadeau, nous pourrons le remplacer par un autre d'une valeur similaire. Pour recevoir votre cadeau sans commander, joignez un chèque de 6,50€ de frais, envoi sous 90 jours. Photos non contractuelles. Pour exercer les droits que vous confère le Règlement européen sur la protection des données, veuillez nous écrire, téléphoner au 01.49.09.11.11 ou consulter nos conditions générales de vente sur notre site internet. Vous bénéficiez des dispositions de la garantie légale de non-conformité et des vices cachés dont la mise en œuvre et le contenu sont prévus aux articles L. 217-4 et suivants du Code de la consommation. Vous disposez d'un délai de rétractation de 30 jours après livraison de votre commande pour retourner les produits pour remboursement ou échange sans pénalités, sauf frais de retour. Traitée dans les 48h suivant sa réception, vous recevez votre commande après 72h d'acheminement environ. Les Laboratoires ILAPHARM adhèrent à la fédération du e-commerce et de la vente à distance (FEVAD) et au service de médiation du e-commerce (BP 20015 - 75362 Paris Cedex 8 - mediateurduecommerce@fevad.com). ADEME emballages : FR202486_01JWKA, ADEME papiers : FR308139_031QWZ. Pour votre santé, mangez au moins 5 fruits et légumes par jour, consultez www.mangerbouger.fr. Conditions générales de vente : www.ilapharm.com/conditions-generales-de-vente.html Si vous ne souhaitez pas recevoir les offres des Laboratoires ILAPHARM, cochez cette case ☐ ou écrivez-nous. Si vous ne souhaitez pas recevoir les offres de nos partenaires (commerciaux ou organismes) : cochez cette case ☐ ou écrivez-nous.

Jamais vu ça

-5 €/mois
et par plateforme de streaming
remise cumulable,
sur tous les abonnements
avec ou sans pub[1].

La Fibre Orange vous offre des mois et des mois de plaisir sur Netflix, Disney+ et Max

Disponible avec l'offre Livebox Max.

Offre soumise à conditions, engagement 12 mois, en France métropolitaine. Avec l'offre Livebox Max à 57,99 €/mois (prix hors promotion), sous réserve d'éligibilité, avec décodeur compatible (frais de mise en service : 40 €). Souscription de la ou des plateformes en plus auprès d'Orange dans un délai de 3 mois suivant la mise en service de l'offre Livebox Max et activation du compte de la plateforme selon les conditions générales d'utilisation de chacune. Remise(s) appliquée(s) sur la facture Orange. Liste des plateformes au 10/10/24 susceptible d'évolution. Perte de la remise en cas de résiliation après les 3 mois. Frais de résiliation Livebox : 50 €. Détails et tarifs sur orange.fr

(1) Hors Netflix Essentiel. Shogun ©2024 Disney et ses sociétés affiliées.

orange™ est là